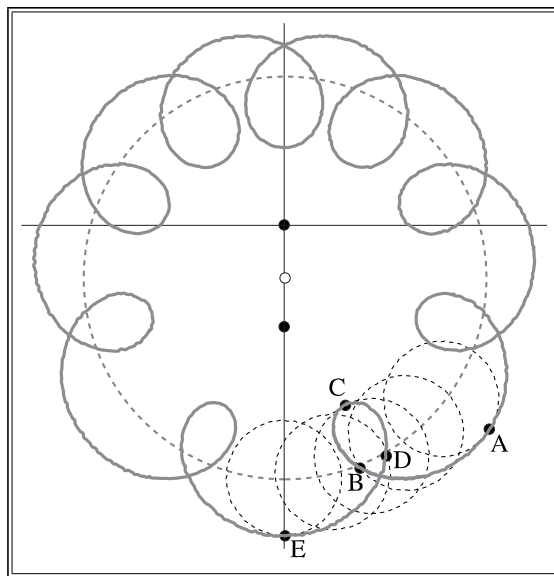


HISTOIRE des SCIENCES

PHQ 399



David Sénéchal

Département de physique
Faculté des sciences
Université de Sherbrooke

Mars 2007

Table des matières

Prologue	7
1 Les origines	11
1.1 Science ou Magie ?	11
1.2 L'origine des civilisations	12
1.2.1 La préhistoire	12
1.2.2 L'apparition de la civilisation	13
1.2.3 L'âge du fer	13
1.3 L'Égypte	14
1.4 La Mésopotamie	16
2 La science grecque	21
2.1 Généralités sur la science grecque	21
2.1.1 Étendue de la civilisation grecque dans l'histoire	21
2.1.2 Le problème des sources	23
2.1.3 Caractère de la science grecque	24
2.2 Les présocratiques	25
2.2.1 Les premiers philosophes ioniens	25
2.2.2 Les Pythagoriciens	27
2.2.3 Autres écoles philosophiques	28
2.3 La période classique	29
2.3.1 Platon et son école	29
2.3.2 Eudoxe de Cnide	30
2.3.3 Aristote	31
2.4 La médecine grecque classique	34
2.5 La période hellénistique	36
2.5.1 Mathématiciens et mécaniciens	37
2.5.2 Astronomes	40
2.5.3 Médecins	46
2.6 Le déclin de la science antique	47
3 L'Orient et le moyen-âge	53
3.1 La Chine	53
3.2 L'Inde	55
3.3 Le monde arabe	57
3.4 Le moyen-âge occidental	60
3.4.1 Qu'est-ce que le moyen-âge ?	60
3.4.2 Pénétration en Occident de la science gréco-arabe	61
3.4.3 Les universités et la scolastique	62
3.4.4 Foi et raison	63
3.4.5 Roger Bacon et la méthode scientifique	65
4 La révolution scientifique	69

4.1	L'algèbre et le calcul infinitésimal	69
4.1.1	Les logarithmes	70
4.1.2	La notation algébrique	71
4.1.3	Les équations algébriques	72
4.1.4	La géométrie analytique	73
4.1.5	Analyse combinatoire et probabilités	74
4.1.6	Le calcul infinitésimal	74
4.2	La révolution copernicienne	76
4.2.1	Copernic	76
4.2.2	Tycho Brahé	80
4.2.3	Kepler	80
4.2.4	Galilée	82
4.3	La naissance de la mécanique	84
4.3.1	Stevin et la statique	84
4.3.2	Les travaux de Galilée	85
4.3.3	Descartes	86
4.3.4	Huygens	89
4.3.5	Newton	90
4.4	La naissance de la méthode expérimentale	93
5	Lumière, électromagnétisme et relativité	95
5.1	Visions de la lumière	95
5.1.1	Les anciens, la lumière et la vision	95
5.1.2	Diffraction et dispersion	98
5.1.3	La théorie corpusculaire de Newton	99
5.1.4	La théorie ondulatoire de Huygens	100
5.1.5	Nouveaux phénomènes et affirmation de la théorie ondulatoire	101
5.2	L'électricité et le magnétisme	103
5.2.1	Les observations qualitatives	103
5.2.2	Les lois mathématiques de l'électricité et du magnétisme	105
5.2.3	Faraday et Maxwell	105
5.2.4	Électromagnétisme et technologie	108
5.3	La relativité restreinte	110
6	Chaleur et énergie	115
6.1	Chaleur et température	115
6.2	Les lois des gaz	117
6.2.1	La pression atmosphérique	117
6.2.2	Pression, volume et température	118
6.3	La machine à vapeur	120
6.4	La thermodynamique	124
6.4.1	Sadi Carnot	124
6.4.2	Énergie et entropie	126
6.4.3	L'interprétation statistique et la théorie cinétique des gaz	129
7	La révolution chimique	133
7.1	Les ancêtres de la chimie	133
7.1.1	L'alchimie	133
7.1.2	Les artisans	135
7.2	La naissance de la chimie	135
7.2.1	Quelques figures des XVII ^e et XVIII ^e siècles	135
7.2.2	La composition de l'air	137
7.2.3	Lavoisier	138
7.3	L'hypothèse atomique	141

7.3.1	L'hypothèse atomique et l'étude des gaz	141
7.3.2	L'électrolyse	144
7.3.3	Le positivisme et les atomes	145
7.4	La chimie organique	146
7.4.1	La synthèse organique	146
7.4.2	La stéréochimie	146
7.4.3	La structure moléculaire	147
8	La structure de la matière	149
8.1	La structure de l'atome	149
8.1.1	Le tableau périodique	149
8.1.2	La spectroscopie	149
8.1.3	L'électron	152
8.1.4	La mécanique quantique	153
8.2	La radioactivité et le monde subnucléaire	156
8.2.1	Des rayons mystérieux	156
8.2.2	Le noyau atomique	158
8.2.3	Le monde subnucléaire	160
9	L'expansion de l'Univers	163
9.1	L'immensité de l'Univers	163
9.1.1	Les instruments astronomiques	163
9.1.2	Le système solaire	164
9.1.3	Les échelles de distance en astronomie	167
9.2	Relativité générale et cosmologie	170
9.2.1	La théorie de la relativité générale	170
9.2.2	La théorie du "big bang"	173
10	Géologie et évolution	175
10.1	La Terre en évolution	175
10.2	L'histoire naturelle et l'évolution des espèces	179
10.2.1	La classification des espèces	179
10.2.2	Fixisme contre transformisme	181
10.2.3	Le darwinisme	183
11	Les mécanismes de la vie	187
11.1	La révolution anatomique et physiologique	187
11.2	La microscopie	189
11.3	La controverse sur la génération	190
11.3.1	Anciennes conceptions de la génération	190
11.3.2	L'oeuvre de Pasteur	191
11.4	La génétique	194
11.4.1	Mendel	194
11.4.2	La localisation des gènes	196
11.4.3	La structure de l'ADN et le code génétique	198
12	La révolution informatique	203
12.1	Avant les ordinateurs : les calculateurs	203
12.2	Les ordinateurs	204
12.3	Les progrès de l'électronique	207
	Épilogue	211
	Bibliographie	215

Prologue

Définition de la Science Il paraît logique, avant d’entreprendre une histoire des sciences, de définir ce qu’on entend par *science*. Le mot lui-même vient du latin *scientia* dont la racine est *scire*, qui veut dire “savoir”. Le ROBERT définit la science comme

Tout corps de connaissances ayant un objet déterminé et reconnu, et une méthode propre ; domaine du savoir, en ce sens.

Il n’y a donc pas une science, mais des sciences, chacune caractérisée par un ensemble de pratiques plus ou moins différenciées, des mathématiques à la sociologie en passant par la comptabilité !

La définition de science utilisée dans ce cours est plus restrictive. Il s’agit plutôt d’une *tentative systématique de connaissance de la Nature par des voies rationnelles*. Autrement dit, nous ne considérons que les sciences de la Nature, ce qu’on appelait autrefois la *Philosophie naturelle*. En langage moderne, ceci signifie la physique, la chimie, la biologie et les disciplines connexes (astronomie, géologie, etc.), auxquelles on ajoute les mathématiques.

La place des mathématiques est singulière, car il s’agit d’un ensemble de concepts et de méthodes dont l’objet n’est pas exclusivement l’étude de la Nature, mais qui s’étend à pratiquement toute l’activité humaine. Nous les incluons tout de même dans notre étude, en raison non seulement de leur importance fondamentale dans l’évolution des connaissances sur la Nature, mais de leur place centrale dans l’évolution de la pensée humaine.

En contrepartie, ce cours se trouve à exclure les éléments suivants :

1. Les parties de la philosophie qui ne s’intéressent pas directement à la Nature ou au processus de connaissance de la Nature.
2. Les sciences humaines en général.
3. Les techniques et la technologie, sauf dans les cas où leur relation avec le développement scientifique est particulièrement étroite, notamment dans le dernier chapitre, qui porte sur l’informatique.

Les qualificatifs *systématique* et *rationnel* dans la définition de la science donnée plus haut sont essentiels. Le premier signifie que les connaissances acquises doivent former le plus possible un tout cohérent, autrement dit qu’on ne doit pas faire appel à de nouveaux principes à chaque fois que se présente un nouveau phénomène ou une observation nouvelle : en autant que faire se peut, les connaissances doivent former un *système*. Le deuxième signifie que les connaissances acquises doivent être soumises aux règles élémentaires de la logique et faire le plus possible abstraction des émotions, des pressions sociales, bref, de notre condition humaine. Ce qui précède est évidemment plutôt imprécis : c’est le rôle de l’*épistémologie* de préciser ces notions. Nous espérons qu’une idée plus claire de ce que constituent la science et la méthode scientifique émergera de ce cours.

Certaines sociétés savantes, dans le but de démarquer la science de pratiques qu’elles considèrent plutôt comme des pseudo-sciences, tentent d’en donner une définition basée sur ses méthodes et ses effets plutôt que sur des champs d’étude précis. Ce qui suit est une définition de la science soumise par l’*American Physical Society* (APS) :

La science agrandit et enrichit nos vies, ouvre notre imagination et nous libère des servitudes de l'ignorance et de la superstition. Les sociétés savantes soussignées désirent énoncer les préceptes de la science moderne qui sont responsables de son succès.

La science est l'entreprise systématique d'acquérir des connaissances sur le monde, d'organiser et de synthétiser ces connaissances en lois et théories vérifiables.

Le succès et la crédibilité de la science prend sa source dans la volonté des scientifiques de

1) Soumettre leurs idées et résultats à la vérification et la reproduction indépendante par d'autres scientifiques, ce qui nécessite l'échange complet et ouvert des données, procédés et matériel.

2) Abandonner ou modifier les conclusions acceptées lorsque confrontés à des évidences expérimentales plus complètes ou fiables.

L'adhésion à ces principes procure un mécanisme d'auto-correction qui est le fondement de la crédibilité de la science.¹

Science, techniques et technologie Une *technique* est un corps de connaissances pratiques visant à exercer une action de manière efficace sur la matière. En général, les techniques anciennes ont été mises au point sans qu'une connaissance rationnelle et systématique de la Nature soit nécessaire. Chaque domaine pratique disposait de règles empiriques, peut-être obtenues par essai et erreur au fil des générations et transmises sans explications générales. C'est la période des *artisans* et des corporations de métier. La contemplation des cathédrales gothiques ou des pyramides d'Égypte suffit à interdire tout mépris à l'égard de ces connaissances pratiques "non scientifiques".

Depuis environ deux siècles, les progrès de la science et des techniques s'influencent et se favorisent mutuellement. Il est donc impossible de séparer complètement science et techniques, car l'état de l'une dépend des progrès de l'autre. Les méthodes d'acquisition de connaissances pratiques sont de nos jours proches des méthodes utilisées dans l'acquisition de connaissances sur la Nature. L'ensemble de ces méthodes peut sans trop d'erreur être qualifié de "méthode scientifique" et les connaissances pratiques résultant de l'application de ces méthodes sont, avec raison, qualifiées de "scientifiques". Ce mariage de science et de techniques porte le nom de *technologie*. De façon grossière, on peut affirmer que la technologie est la "science au service de l'humanité". Il serait plus juste de parler de technologies au pluriel, car chaque domaine d'activité fait appel à des ressources scientifiques en proportions différentes, que ce soit la microélectronique, le génie mécanique, la médecine thérapeutique, etc. En résumé, la science (au sens strict) et la technologie diffèrent donc par leur *objet*, même si leurs méthodes sont apparentées.

Ce cours, par choix, se limite à l'étude des sciences naturelles et des mathématiques. Les progrès techniques réalisés dans les temps anciens sont délibérément négligés, en dépit de leur immense intérêt. Cependant, les allusions aux progrès techniques se feront de plus en plus nombreuses au fur et à mesure que le récit se rapprochera de nous dans le temps.

Thèmes couverts dans ce cours Avant de s'engager dans un cours d'histoire des sciences aux dimensions restreintes comme celui-ci, plusieurs avertissements sont de mise. Premièrement, le sujet lui-même est si vaste qu'un cours de trois mois ne peut absolument lui rendre justice et que les sujets couverts par le cours, ainsi que la profondeur de leur couverture, doit faire l'objet d'un choix judicieux. Il faut exercer un certain nombre de compromis en mettant en balance l'importance des sujets choisis dans l'histoire des idées (leur caractère plus ou moins fondamental), le niveau de préparation des étudiants à l'étude de ces sujets et, enfin, l'expertise particulière du professeur, adéquate dans certains sujets et minimale dans d'autres.

L'importance des sciences physiques dans ce cours, par rapport à la biologie, tient d'une part à l'expertise du professeur et, d'autre part, à leur développement relativement ancien, bien adapté à l'étude de l'histoire.

¹"Science extends and enriches our lives, expands our imagination and liberates us from the bounds of ignorance and superstition. The endorsing societies wish to affirm the precepts of modern science that are responsible for its success.

Science is a systematic enterprise of gathering knowledge about the world and organizing and condensing that knowledge into testable laws and theories.

The success and credibility of science is anchored in the willingness of scientists to : (1) Expose their ideas and results to independent testing and replication by other scientists. This requires the complete and open exchange of data, procedures and material. (2) Abandon or modify accepted conclusions when confronted with more complete or reliable experimental evidence.

Adherence to these principles provides a mechanism for self-correction that is the foundation of the credibility of science."

De plus, nous voulons insister sur l'histoire des sciences comme "histoire des idées" et ne voulons pas tomber dans une énumération de découvertes particulières qui, bien que fascinantes en soi, n'ont pas remis en cause notre vision du monde. Ceci justifie l'importance accordée aux concepts de mouvement, d'énergie, de structure de la matière, d'évolution des espèces et excuse que l'on néglige la mécanique des fluides, la synthèse organique ou la physiologie des plantes.

Chapitre 1

Les origines

1.1 Science ou Magie ?

Il est pratiquement impossible de dire à quelle époque sont apparues les premières formes d'activité scientifique, si par là on entend une connaissance pratique de la Nature basée sur l'expérience. Les hommes de la préhistoire se livraient à des activités non instinctives, telles la fabrications d'outils rudimentaires, l'allumage du feu et, plus tard, l'agriculture ; ces activités demandaient la transmission, par l'éducation, d'une connaissance acquise par l'observation et l'expérience. Cependant, ces connaissances ne s'inséraient pas, au départ, dans un *système rationnel*. Au contraire, elles étaient souvent associées à des "forces" ou "puissances" de la Nature que les humains espéraient conjurer en respectant un certain rituel. Ces rites constituaient ce qu'on a appelé la *magie*.

Quelles étaient les croyances essentielles de la magie, telle qu'elle fonctionna chez les peuples les plus anciens et telle qu'elle persiste parmi certaines cultures primitives contemporaines ? *Grosso modo*, la magie exprime une vision animiste de la Nature. Le monde était peuplé et contrôlé par des esprits et par des forces spirituelles cachées qui résidaient peut-être dans les animaux ou les arbres, dans la mer ou dans le vent, et le devoir du magicien était de plier ces forces à son projet, d'obtenir la coopération des esprits. Il procédait à des incantations, jetait des sorts et préparait des potions, en fonction de sa vision d'un monde d'affinités et de sympathies. Ce point de vue pouvait conduire à une magie sympathique, ou imitative, qui poussait les hommes à manger la chair d'un animal, afin de s'approprier certaines de ses qualités, où à se vêtir comme les animaux et à mimer leur capture et leur mort afin que leurs chasses soient couronnées de succès. Dessiner et peindre des images d'animaux ou exécuter des figurines à leur ressemblances revenait à s'approprier une partie de leur puissance ; c'était aussi les affaiblir et faciliter leur capture. Le monde magique était un monde de rapports plutôt qu'un monde d'objets indépendants ; il était basé sur les interrelations de l'homme avec la vie et avec les conditions qu'il trouvait autour de lui, dans un monde où les forces étaient personnifiées et où chaque chose exerçait une influence spécifique.¹

On peut affirmer que la magie a rempli un rôle utile d'organisation et de préservation des connaissances pratiques. Par exemple, le rite magique associé au solstice d'hiver n'était peut-être pas nécessaire pour que les jours rallongent effectivement, mais il avait au moins le mérite de codifier et de préserver la connaissance du solstice. Par contre, les explications que la magie fournissait des phénomènes naturels, généralement basées sur l'intervention de puissances divines, n'étaient pas *fécondes* : elles ne permettaient pas de susciter des observations ou des techniques nouvelles, contrairement à ce qui est de nos jours attendu d'une théorie scientifique.

¹Tiré de C. Ronan [62], p. 12.

Les connaissances magiques reposaient dans une caste particulière d'individus : mages, prêtres ou sorciers, responsables de la communication avec les puissances divines. Au cours des millénaires, les pratiques magiques ont connu de multiples différenciations, certaines évoluant vers les religions antiques (dont la mythologie des religions polythéistes) et d'autres vers des connaissances plus pratiques relativement dépourvues de spiritualité. Il reste qu'en tant que tentative de comprendre et contrôler la Nature, la magie est l'ancêtre de la science.

Si par *science* on entend un rejet de la magie et des causes surnaturelles au profit d'un ordre naturel indépendant des volontés divines, alors on peut avec justesse en faire remonter l'origine aux Grecs. Il faut cependant rester prudent sur cette affirmation, car notre connaissance des civilisations qui influencèrent les Grecs (l'Égypte et la Mésopotamie) est bien moins complète que notre connaissance de la civilisation grecque ; les Grecs eux-mêmes affirmaient qu'ils devaient énormément à l'Égypte. Parce que la civilisation grecque a éventuellement dominé les territoires de l'Égypte et de la Mésopotamie, elle jette sur ces anciennes civilisations un voile mystérieux que seule l'archéologie, à partir du début du XIX^e siècle, a levé partiellement. Il faut garder à l'esprit que ce n'est pas suite aux découvertes archéologiques que ces antiques civilisations ont exercé une influence sur nous, mais par l'intermédiaire des Grecs et, dans une certaine mesure, par celui de la Bible.

Il paraît donc juste de jeter un coup d'oeil rapide sur l'évolution des sociétés humaines jusqu'à l'aube de la civilisation grecque. C'est le but du reste de ce chapitre.

1.2 L'origine des civilisations

1.2.1 La préhistoire

Il est conventionnel de faire débiter l'histoire à l'époque de l'invention de l'écriture. Notre connaissance de la préhistoire est donc basée exclusivement sur l'analyse d'artefacts découverts lors de fouilles archéologiques. La préhistoire est divisée en différentes périodes caractérisées par des techniques particulières :

- Le *paléolithique* est l'époque la plus ancienne, caractérisée par la technique de la pierre taillée et un mode de vie nomade ignorant l'élevage ou l'agriculture. Les humains vivaient alors de chasse et de cueillette. Cette époque débute il y a trois millions d'années, bien avant que l'espèce humaine ait atteint son apparence actuelle. Parmi les techniques développées au cours du paléolithique, signalons la domestication du feu, la fabrication de vêtements et de contenants à partir de peaux animales, la fabrication d'outils de chasse et de canots. La domestication du chien date probablement du paléolithique.
- Le *néolithique* est défini à l'origine par l'utilisation de la pierre polie, mais est surtout caractérisé par l'apparition de l'élevage (domestication de la chèvre, du porc et des bovidés) et de l'agriculture, donc par une sédentarisation (au moins saisonnière) des populations. Les traces les plus anciennes d'une population néolithique se trouvent au Moyen-orient et datent d'entre 9 000 et 6 000 ans avant notre ère. À cette époque furent aussi développés l'art de la poterie, du tissage, de la construction en pierre. L'invention de la roue remonte à cette période. L'invention de l'agriculture constitue peut-être la plus grande révolution dans l'évolution de la race humaine. Outre la sédentarisation des populations, elle a aussi nécessité une planification à long terme du travail. Le mythe biblique de la *chute de l'Homme* – qui se retrouve aussi dans d'autres mythologies que l'hébraïque – est un souvenir de cette invention, par laquelle désormais les humains devaient travailler la terre à la sueur de leur front pour survivre, travail heureusement compensé par une relative stabilité dans l'alimentation.
- L'apparition des premiers fourneaux coïncide avec le début de l'*âge des métaux*. Les premiers métaux furent natifs (or, argent et cuivre) et utilisés principalement à des fins décoratives. Le cuivre fut ensuite extrait de ses minerais, ce qui est plus difficile, et combiné en alliage avec l'étain pour former le bronze (ou airain), métal à la fois plus dur et ayant un point de fusion plus bas que le cuivre. Cet âge des métaux coïncide approximativement avec l'apparition des premières civilisations, mais n'est pas un prérequis technique obligé, car les outils de pierre sont encore prédominants à cette époque. D'ailleurs, les civilisations précolombiennes (Mayas, Aztèques, Incas) n'utilisaient les métaux que comme ornements.

La métallurgie, même primitive, est une activité relativement sophistiquée demandant un sens aigu de l'observation et une forme évoluée de transmission des connaissances. Cependant, elle ne nécessite pas une connaissance étendue, rationnelle et systématique de la nature : c'est une technique et non une science.

1.2.2 L'apparition de la civilisation

Le mot "civilisation" dérive du latin *civis* qui veut dire "citoyen". Il sous-entend donc une société, un regroupement de populations dans lequel chaque personne a un rôle déterminé : les tâches y sont spécialisées et les rapports entre individus sont régis par des règles organisées autour d'un lien d'autorité. En particulier, il existe des *lois* et un système judiciaire (aussi arbitraire soit-il) qui a pour but de régler les différents entre individus en évitant autant que possible les règlements de comptes personnels.

On s'accorde à penser que les premières civilisations sont nées de l'organisation à grande échelle de l'agriculture, sur les rives des grands fleuves du Moyen-Orient (Nil, Euphrate, Tigre, Indus) et de la Chine. L'agriculture à proximité des grands fleuves bénéficie d'une terre facile à travailler et de la crue des eaux, qui doit être mise à profit par des travaux d'irrigation considérables. La mise en commun des ressources et l'organisation du travail sont alors nécessaires et donnent un avantage certain aux populations travaillant de concert. L'apparition des villes est une conséquence de la civilisation (et non une cause) car (i) elle demande une spécialisation du travail suffisante pour justifier une agglomération d'artisans, de marchands et de non-paysans en général et (ii) elle nécessite des surplus agricoles importants afin de nourrir cette population.

La période historique comme telle débute avec l'invention de l'écriture, vers 3000 ans avant notre ère, en Mésopotamie et en Égypte. Avec l'écriture apparaît la classe des *scribes*, ceux qui maîtrisent cet art compliqué et qui peuvent désormais transmettre les connaissances de manière plus précise et permanente que par tradition orale. L'écriture semble être née directement du besoin de tenir un inventaire des produits agricoles, et donc fut utilisée premièrement en conjonction avec les premiers systèmes de numération.

1.2.3 L'âge du fer

L'Égypte et la Mésopotamie étaient des civilisations de l'*âge du bronze*. Ces civilisations furent ébranlées au milieu du deuxième millénaire avant notre ère par l'arrivée de l'*âge du fer*, dont la signification historique fut immense. Le fer est plus difficile à travailler que le bronze, en raison de sa plus grande température de fusion, requérant des fours plus sophistiqués. Notons que le bronze était coulé dans des moules, alors que le fer n'était que ramolli et forgé.² Par contre, le minerai de fer est beaucoup plus abondant que le minerai de cuivre. Pendant l'âge du bronze, la rareté du métal en faisait un objet de luxe, apanage des nobles et des guerriers. Les paysans ne possédaient que des outils de pierre rendant difficile toute agriculture en dehors de zones étroites près des rivières, où la terre est facile à travailler, telles l'Égypte et la Mésopotamie. Dans ces pays, l'agriculture était une entreprise d'état en raison des travaux communautaires importants qu'elle impliquait (irrigation, distribution, etc.). La technologie limitée du bronze a donc imposé un système social rigide et stable, fondé sur des états puissants et comportant aussi des villes importantes.

L'arrivée du fer a démocratisé l'outillage en métal. Le fer a permis d'étendre l'agriculture à des régions autrement couvertes de forêts, comme l'Europe, où le climat ne demandait pas d'importants travaux d'irrigation. Il a ainsi rapetissé l'unité sociale minimale, car l'agriculture ne demandait plus d'organisation sociale lourde. Comme elle a aussi répandu l'usage d'armes très efficaces, l'arrivée du fer a entraîné une période de chaos assez sévère, ponctuée de guerres incessantes. Il est probable que les habitants de l'âge du fer aient considéré avec nostalgie les civilisations plus stables et en apparence plus riches de l'âge du bronze. Cependant, le fer a permis de nombreuses innovations techniques et économiques, notamment en navigation, qui ont peu à peu favorisé l'éclosion de nouvelles civilisations : Hittites, Phéniciens et surtout Grecs. En somme, l'avènement de l'âge du fer est comparable en importance à la chute de l'empire romain :

²La fonte du fer nécessite des fours plus efficaces encore, et ne fut réalisée que plus tard, premièrement en Chine (IIe siècle avant notre ère) et en Inde avant d'atteindre le Moyen-Orient et l'Europe.

TAB. 1.1: Chronologie politique de l'Égypte.

-3000/-2778	Dynasties I et II.
-2778/-2263	Ancien empire. Dynasties III-VI. Pyramides de Giza. Imhotep.
-2263/v.-2065	Première période intermédiaire. Guerres civiles. Dynasties VII-XI.
-2065/-1785	Moyen empire. dynastie XII.
-1785/-1580	Deuxième période intermédiaire. Domination des Hyksos. Dynasties XIII-XVII.
-1580/-1085	Nouvel empire. Dynasties XVIII-XX. Pharaons Aménophis, Toutmès, Sêti, Ramsès. Temples de Karnak, Louxor, vallée des rois.
-1085/-664	Décadence de l'empire. Dynasties XXI-XXV.
-664/-525	Invasion assyrienne. Dynastie XXVI (saïte).
-525/-332	Domination perse, intercalée d'une période d'indépendance. Dynasties XXVII-XXX.
-332/-31	Conquête d'Alexandre : époque hellénistique ou <i>ptolémaïque</i> (rois lagides). Alexandrie.
-31/642	Période romaine et byzantine, achevée par la conquête arabe en 642.

une période de relative obscurité et de chaos, suivie d'une période de progrès techniques et finalement de l'éclosion d'une civilisation encore plus prospère et diversifiée que la précédente.

1.3 L'Égypte

L'Égypte dans l'histoire L'Égypte fut l'hôte, avec la Mésopotamie, de la première grande civilisation de l'Antiquité. Ce pays est entièrement dépendant de son artère, le Nil, et de ses crues annuelles qui fertilisent le sol. Les rois qui régnèrent sur l'Égypte (pharaons) furent classifiés par les historiens de l'Antiquité en trente *dynasties*. Le premier pharaon (première dynastie) fut Ménès (ou Narmer) qui unifia la Haute-Égypte et la Basse-Égypte. La chronologie approximative du pouvoir égyptien est indiquée au tableau 1.1.

Caractère des connaissances égyptiennes L'Égypte ancienne était un état monarchique centralisé. Les *scribes*, sorte de fonctionnaires-comptables, étaient responsables de l'inventaire et de la distribution des récoltes et c'est entre leurs mains que reposait le savoir transmissible des égyptiens, en particulier en mathématiques.

Paradoxalement, l'époque la plus féconde en inventions techniques est l'*Ancien empire* (l'époque des grandes pyramides). Par exemple, les grandes pyramides de Chéops et de Chéphren ont leur faces orientées vers les quatre points cardinaux avec une précision de 2'28" et nous ignorons comment les constructeurs y sont

parvenus.³ Nous ignorons aussi comment les Égyptiens ont réussi à assembler ces monuments. L'historien grec HÉRODOTE (–484/ – 425) écrit que 100 000 hommes travaillèrent pendant 20 ans à la construction de la pyramide de Chéops, mais celui-ci est souvent peu fiable quand il cite des nombres.

Platon traite les Égyptiens de “peuple de boutiquiers”⁴, caractérisé par un “amour de la richesse” et non un amour de la science. Les connaissances égyptiennes avaient en effet un caractère technique et utilitaire. Les Égyptiens n’ont pas senti le besoin d’élaborer un système cohérent de la Nature.

Les mathématiques Les documents parvenus jusqu’à nous démontrent une absence de raisonnement dans les mathématiques égyptiennes. Ils sont remplis d’exemples d’applications de règles pratiques de calcul.

Les Égyptiens ont un système de numération *juxtapositionnel* (analogue aux chiffres romains) : ils ont des signes pour l’unité, la dizaine, la centaine, etc. et répètent les symboles le nombre de fois requis.⁵ L’importance du nombre 10 provient vraisemblablement de nos dix doigts, utilisés pour compter depuis les temps préhistoriques. Les Égyptiens ne connaissent que les entiers, les fractions unitaires (de la forme $1/n$, où n est un entier) ainsi que la fraction $2/3$. Toutes les autres fractions doivent être réduites à des combinaisons de ces dernières.⁶

$$\begin{array}{ll}
 1 = | & 4 = |||| \\
 10 = \cap & 36 = \cap\cap\cap ||| \\
 100 = \varphi & 7325 = \begin{array}{c} \text{IIII} \\ \text{IIII} \end{array} \varphi\varphi\varphi \cap\cap ||| \\
 1000 = \text{IIII} &
 \end{array}$$

FIG. 1.1 : Exemples de numération juxtapositionnelle égyptienne. Chaque puissance de dix possède son symbole, jusqu’à 10^6 .

Les Égyptiens peuvent résoudre des équations linéaires, par la méthode dite des “fausses positions”, qui consiste à deviner une solution et à la corriger au besoin.⁷

Hérodote attribue aux Égyptiens l’invention de la géométrie. En fait, leurs connaissances géométriques sont purement pratiques et empiriques. Ils savent comment calculer l’aire d’un rectangle, d’un trapèze, d’un triangle. Ils savent que le volume d’une pyramide est $\frac{1}{3}Bh$ (B : base, h : hauteur). Notons que la démonstration de cette dernière formule nécessite un raisonnement à la base du calcul intégral, mais nous ne savons pas comment les Égyptiens y sont parvenus. Ceux-ci adoptent la valeur $\pi \approx (\frac{16}{9})^2 = 3,1605\dots$. En général, les Égyptiens sont plus forts en géométrie qu’en arithmétique, en raison de leur système de numération déficient.

L’astronomie Les Égyptiens distinguent les planètes des étoiles. Ils disposent d’instruments de mesure rudimentaires des positions astronomiques.⁸ Ils savent que la crue du Nil coïncide avec le *lever héliaque* de Sirius (Sothis). Ils disposent du meilleur calendrier de l’Antiquité : une année divisée en 12 mois de 30 jours, plus 5 jours dits *épagomènes*. Ce calendrier sous-estime d’environ 6 heures la durée de l’année et mène à des “solstices flottants” (année errante), c’est-à-dire à un décalage progressif des saisons (une saison de recul à tous les 360 ans, environ). Ce sont les rois lagides qui demanderont la mise au point d’un nouveau calendrier, avec une année bissextile tous les quatre ans pour corriger la situation. Ce calendrier fut imposé par César en –47, d’où son nom de *calendrier julien*.

³Les prétendues correspondances entre les dimensions de la grande pyramide et celles du système solaire sont non fondées.

⁴Napoléon a dit la même chose des Anglais.

⁵Voir [18], p. 14. Voir aussi [37], chap. 14.

⁶Voir [18], pp. 14-15, pour un exemple de calcul.

⁷Voir [18], p. 75.

⁸Voir [76], vol. I, p. 44.

Les Égyptiens mesuraient le temps à l'aide de cadrans solaires durant le jour et de *clepsydras* (horloges à eau) pendant la nuit. Ces dernières étaient très imprécises, car les Égyptiens ne connaissaient pas la relation entre le niveau de l'eau et la pression exercée au fond du récipient. Les clepsydras furent améliorées à l'époque gréco-romaine, en particulier par le Grec Ctésibios, et furent la forme d'horloge la plus utilisée sous l'empire romain.

La médecine Notre connaissance de la médecine égyptienne, comme des autres volets de cette civilisation, est basée surtout sur la découverte de nombreux papyrus où des diagnostics et des traitements sont consignés. Le fondateur légendaire de la médecine égyptienne est le médecin-architecte IMHOTEP, au service du pharaon Djôser, qui vécut vers –2800/–2700. Ce personnage fut plus tard divinisé et reconnu comme le dieu de la médecine.

La médecine égyptienne est hybride : d'une part elle contient une forte dose de magie ; des incantations prononcées par le médecin sont supposées apporter par elles mêmes la guérison, même si elles sont souvent accompagnées de cataplasmes ou de potions. D'autre part, l'utilisation de drogues découvertes empiriquement semble également importante. Fait significatif, le médecin égyptien n'est pas un prêtre, mais un artisan, dont le savoir doit être transmis de façon héréditaire : on est médecin de père en fils, comme on est scribe, ou armurier, ou cordonnier de père en fils.

Il semble que la chirurgie égyptienne ait été supérieure à la médecine. Les Égyptiens savaient comment recoudre des plaies ; ils procédaient à des obturations dentaires avec de l'or ; ils réparaient les fractures en remplaçant les os et en les maintenant à l'aide d'éclisses de bois.

1.4 La Mésopotamie

La Mésopotamie dans l'histoire La Mésopotamie est le “pays entre deux fleuves”⁹ le Tigre et l'Euphrate. La Mésopotamie n'a pas, en général, connu l'unité politique de l'Égypte, mais il s'y développa une civilisation aussi ancienne que sur les rives du Nil. La chronologie ci-dessous est donc toute approximative et n'évoque que les courants principaux. L'utilisation de briques plutôt que de pierres dans la construction des grands bâtiments a fait que la civilisation mésopotamienne n'a pas laissé de traces aussi durables que l'égyptienne. À partir du milieu du XIXe siècle, les archéologues ont découvert les ruines de plusieurs cités enfouies, telles Our, Babylone (Babel), Ninive, qui ont progressivement révélé l'ampleur de la civilisation mésopotamienne.

La plus ancienne civilisation de Mésopotamie s'est développée à proximité des embouchures des fleuves, vers –3000, dans la région qu'on appelle Sumer. La majeure partie des connaissances techniques de la Mésopotamie semble dater de l'époque des Sumériens, soit le troisième millénaire avant notre ère. On ignore l'origine du peuple sumérien, mais au deuxième millénaire, des peuples sémites venus de l'ouest s'installent dans la région et le pouvoir se déplace un peu vers le nord ; la ville de Babylone (ou Babel) devient le centre le plus important.¹⁰

Au milieu du deuxième millénaire, des peuples connaissant l'usage du fer (les Hittites) envahissent la Mésopotamie et par la suite, au premier millénaire, le pouvoir se déplace vers le nord, dans la région connue sous le nom d'*Assyrie*. Les Assyriens, renommés pour leur cruauté, établirent une domination militaire sur tout l'Orient (incluant l'Égypte pendant un certain temps). Les Assyriens conservèrent la langue et l'écriture des Babyloniens. La majeure partie des documents écrits que nous possédons sur la Mésopotamie provient de fouilles effectuées en Assyrie.

Au premier millénaire, un peuple installé en Syrie, les *Araméens*, finit par imposer sa langue dans tout l'Orient (l'araméen était la langue maternelle de Jésus). Dans cette langue, les peuples habitant la basse

⁹Du grec *meso-potamios* : “entre deux fleuves”.

¹⁰Rappelons que, d'après la Genèse, le peuple hébreu est originaire d'Our, en Sumer. D'ailleurs, les mythes de la Création et du Déluge qu'on retrouve dans la Bible sont tirés de mythes sumériens encore plus anciens. En particulier, des preuves archéologiques irréfutables du *Déluge*, sorte d'inondation prolongée ayant affecté toute la basse Mésopotamie vers –3200, ont été mises à jour dans les années 1920.

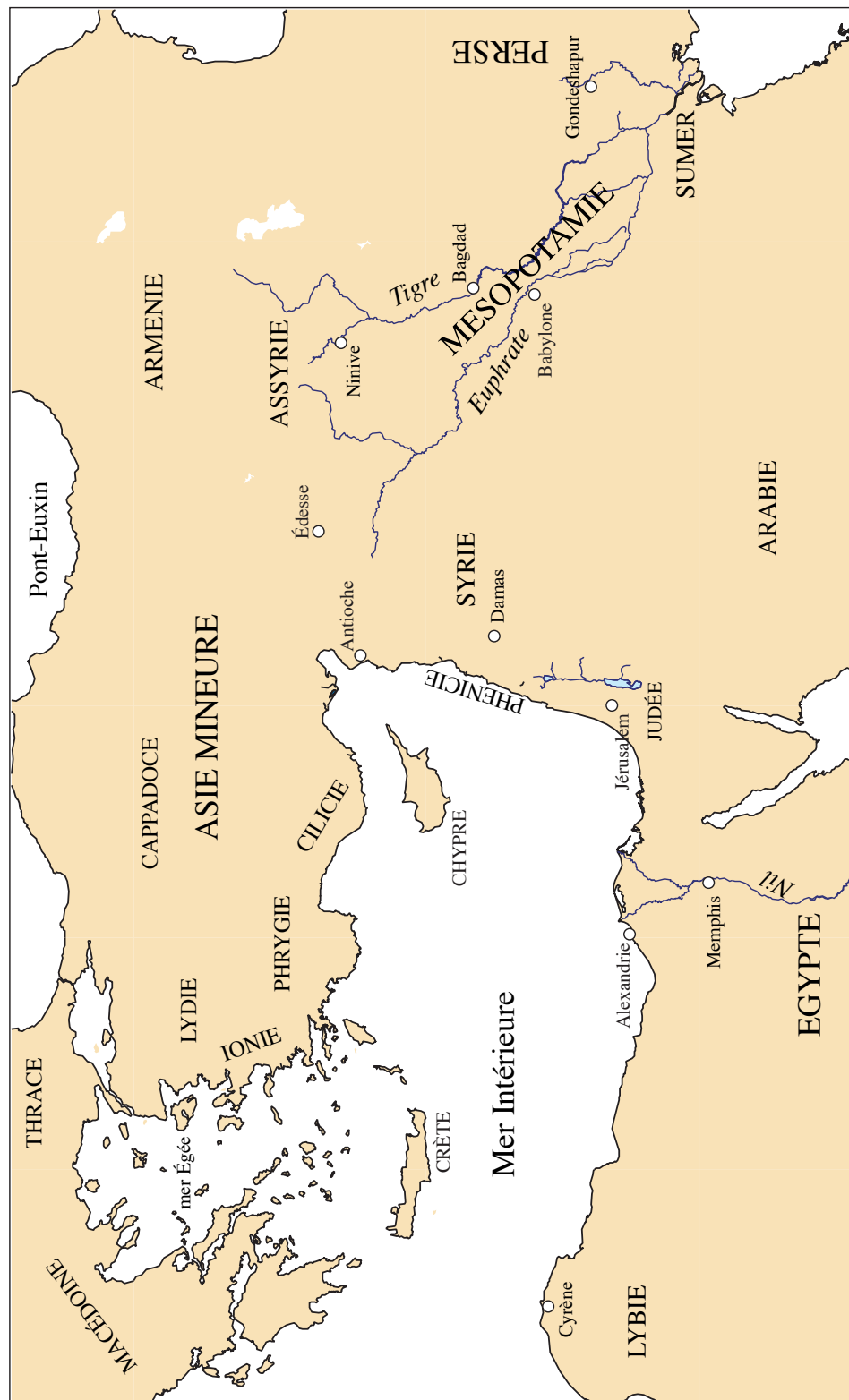


FIG. 1.2: Carte de l'Orient antique.

TAB. 1.2: Chronologie politique de la Mésopotamie.

?/-2400	Sumer.
-2400/-2200	Contrôle par les Sémites venus de l'ouest. Empire de Sargon d'Akkad.
-2200/-2000	Apogée de la civilisation sumérienne. Absorption progressive de ce peuple par les sémites.
-2000/-1650	Royaumes sémites de Babylone, Mari, etc. Roi Hammourabi (vers -1780).
-1650/ ?	Sujétion de la Mésopotamie à des peuples étrangers (Hittites, Hourrites, Cassites).
?/-615	Domination de l'Assyrie. Rois Assourbanipal et Sargon. Poussée des Araméens de l'ouest.
-615/-539	Empire néo-babylonien. Nabuchodonosor.
-538/-330	Domination des Perses (dynastie achéménide).
-330/-104	Domination des Grecs (dynastie séleucide).
-104/226	Domination des Parthes (dynastie arsacide).
226/651	Domination des Perses (dynastie sassanide), terminée par la conquête arabe.

Mésopotamie s'appelaient eux-même *Kaldou*, qui devint *Kaldaioi* en grec et *Chaldéens* en français. Pour cette raison, la basse Mésopotamie est souvent appelée *Chaldée* et ses habitants *Chaldéens*, sans égard à la période historique envisagée. Dans l'Antiquité, le mot "chaldéen" désigne aussi un astrologue, car la pratique de l'astrologie est originaire de Mésopotamie.

À la suite de la destruction de l'empire assyrien par les Mèdes, un peuple indo-européen habitant l'Iran actuel, Babylone sera le centre, pendant environ un siècle, d'un empire puissant dont Nabuchodonosor sera le roi le plus connu. Cet empire sera finalement abbatu en -538 par les Perses et les Mèdes, qui fondent un empire multinational dans tout l'Orient (des frontières de l'Inde à celles de la Grèce). Cet empire, souvent surnommé *achéménide*, dut son nom de la dynastie qui le gouverna, adopta l'araméen comme langue officielle. Il sera à son tour conquis par Alexandre le Grand vers -330.

Les connaissances chaldéennes nous sont parvenues principalement sous la forme de tablettes de terre cuite couvertes de caractères dits *cunéiformes* (en forme de coin), parce qu'imprimés avec un roseau taillé. Cette écriture a été utilisée pendant plus de 3000 ans, à partir de -3500. On possède des centaines de milliers de telles tablettes, trouvées lors de multiples fouilles archéologiques, en particulier à Ninive, capitale de l'Assyrie (l'un de ses rois, Assourbanipal, était célèbre pour la grandeur de sa bibliothèque). Les constructions mésopotamiennes en brique étaient moins durables que les monuments égyptiens en pierre, mais les tablettes en terre cuite sont beaucoup plus durables que les documents égyptiens écrits sur papyrus et nous disposons donc de beaucoup plus de documents mésopotamiens que de documents égyptiens.

Les mathématiques La force des mathématiques chaldéennes réside dans leur système de numération *positionnel*, à base 60 (sexagésimal). La division du cercle en 360 degrés, du degré en 60 minutes et de la minute en 60 secondes (et pareillement pour les unités de temps) remonte aux Chaldéens, qui l'ont transmis aux Grecs. Les Chaldéens ignorent le zéro, ce qui rend leur notation ambiguë. Ils appliquent leur système de numération aux fractions.¹¹

Les Chaldéens peuvent aussi être considérés comme les fondateurs de l'*algèbre*, même s'ils ne possèdent pas

¹¹À l'époque séleucide cependant, l'équivalent d'un point décimal sera introduit et les fractions sexagésimales seront utilisées (minutes, secondes, tierces, etc.).

∇	= 1	$\langle\langle \nabla$	= 21
$\nabla\nabla\nabla$	= 3	∇	= 60
$\nabla\nabla\nabla$	= 8	$\nabla\langle\langle$	= 80
\langle	= 10	$\langle\langle\langle$	= $1/2 = 30/60$

FIG. 1.3 : Exemples de numération positionnelle chaldéenne. Notons que le symbole représentant $1/2$ (c'est-à-dire $30/60$) est le même que pour 30, en raison de l'absence de point décimal. De même, les nombres 1 et 60 ont des symboles identiques. C'est le contexte qui détermine où se trouve le point décimal !

de notation particulière pour les inconnues et les opérations : les problèmes sont posés en langage courant.

1. Ils connaissent la solution de l'équation quadratique (sans les racines imaginaires, négatives ou irrationnelles).
2. Ils utilisent le concept de *fonction* (sans le nommer), car ils ont des tables de correspondance entre une variable et une autre, notamment dans leurs éphémérides.
3. Ils réduisent les problèmes de géométrie à des problèmes de calcul (d'algèbre). Ils connaissent le "théorème de Pythagore" mais n'ont aucune géométrie du cercle (ils adoptent $\pi \approx 3$).

L'astronomie La magie et l'astrologie jouaient un rôle social important en Mésopotamie. Par conséquent les observations astronomiques des Chaldéens furent nombreuses. Les savants du temps d'Alexandre le Grand disposaient des observations babyloniennes faites 1900 ans auparavant !

1. Les Chaldéens utilisaient un calendrier *lunaire*. Comme la période de la Lune (29 j., 12h., 44 min., ou 29,531 jours) est incommensurable avec l'année et que la rotation de la Lune autour de la Terre présente certaines irrégularités, il était très important pour les Chaldéens de posséder des *éphémérides* précises sur la position de la Lune. Ils conclurent que l'année solaire est de $12\frac{22}{60}$ mois lunaires, soit 365,20 jours. Ceci est remarquablement proche de la réalité (365,26 jours).
2. Ils pouvaient prédire les éclipses de Lune et les possibilités d'éclipse de Soleil (c'est-à-dire qu'ils pouvaient dire quand une éclipse de Soleil avait de bonnes chances de se produire, sans nécessairement réussir à tous les coups). Rappelons que les éclipses ne se produisent pas à tous les mois car l'orbite lunaire est légèrement inclinée (5°) par rapport à l'écliptique.
3. Ils sont les auteurs du Zodiaque et de sa division en douze constellations.
4. Ils ont observé les positions des planètes, sans toutefois élaborer une théorie pour les expliquer.¹²

¹²Ceci constitue une forme de positivisme avant la lettre.

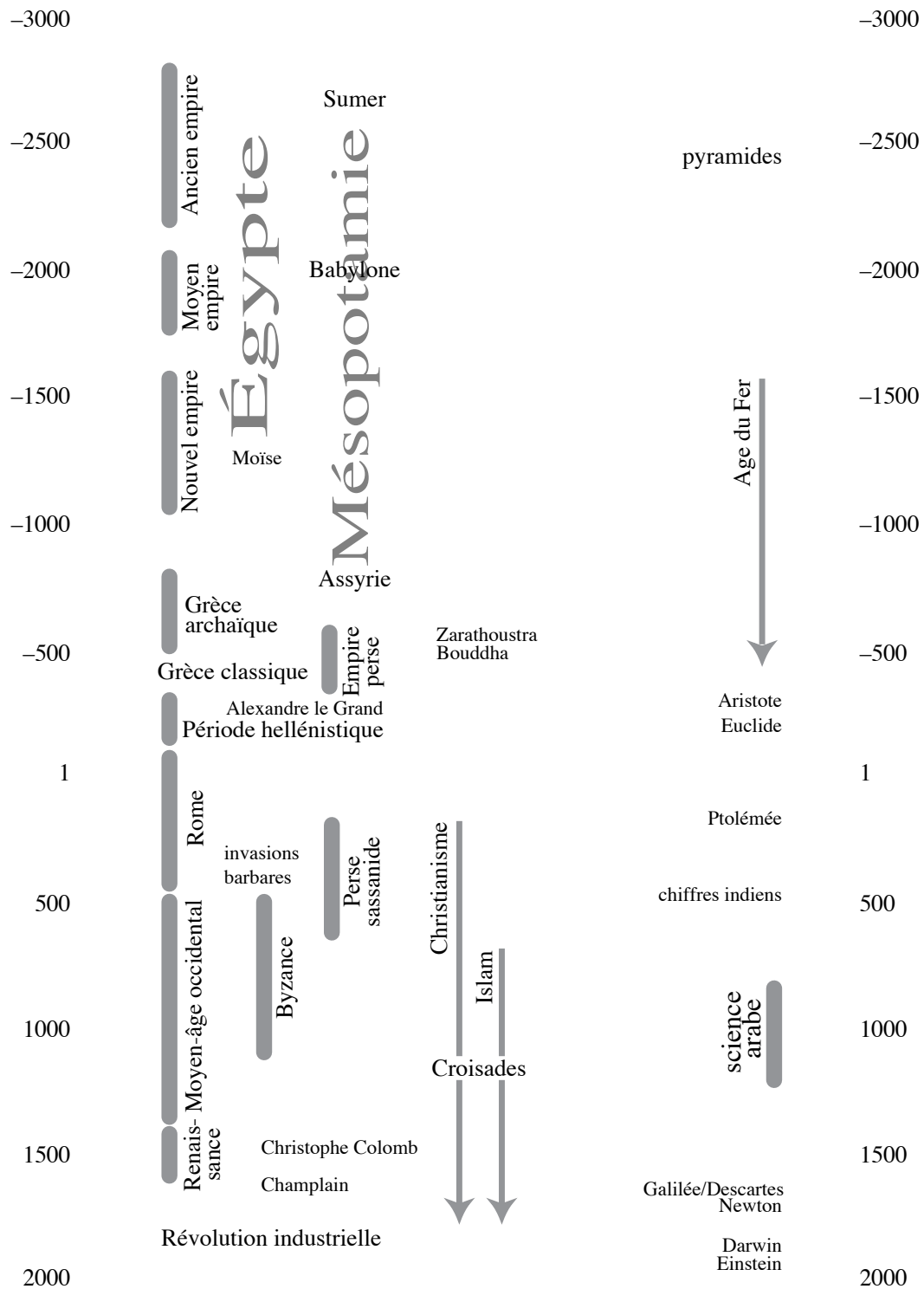


FIG. 1.4: Chronologie sommaire de l'histoire de l'humanité.

Chapitre 2

La science grecque

2.1 Généralités sur la science grecque

2.1.1 Étendue de la civilisation grecque dans l'histoire

Ceux qu'on appelle les Grecs, mais qui s'appellent eux-même *Hellènes* (Ἕλληνες), sont d'origine indo-aryenne et ont peuplé la Grèce actuelle vers l'an -2000 (Ioniens et Achéens) ou vers l'an -1100 (Doriens). Les Ioniens ont été en contact avec les civilisations antérieures (Crète) et ont développé un sens du commerce et de la navigation. Ils ont été refoulés sur les côtes de l'Asie mineure par les Doriens caractérisés par une société de type militaire peu intéressée par le commerce. À l'origine les Hellènes s'organisèrent en petits royaumes indépendants (cités). La royauté fit place à l'aristocratie avec l'apparition de grands propriétaires terriens (nobles). On distingue habituellement les périodes suivantes dans l'histoire de la civilisation grecque :

1. Durant l'*époque archaïque* (-750/-500) l'économie mercantile se développa et la bourgeoisie fit son apparition. La montée de la bourgeoisie (par rapport à l'aristocratie) s'accompagna de changements politiques et de luttes intestines. Des *tyrans*¹ enlevèrent le pouvoir aux aristocrates et favorisèrent la bourgeoisie et en même temps l'éclosion des sciences et de la philosophie. À cette époque, plusieurs cités fondèrent des colonies autour de la mer Égée, en Italie du sud (Grande Grèce), en Sicile. La seule cité de Milet fonda 80 colonies, dont Naucratis, sur le delta du Nil. Parmi les colonies de Phocée figure Massalia (Marseille), fondée vers -600. La civilisation grecque se répandit sur presque toute la Méditerranée et sur la mer Noire. Cependant, aucune unité politique ne se réalisa et chaque citée était indépendante, même si les colonies conservaient souvent un lien de fidélité à la citée mère (métropole).
2. L'époque suivante (-500/-338) est la période dite *classique*. Le système démocratique se répand. L'Ionie est conquise par les Perses et la Grèce continentale lutte contre ces derniers (guerres médiques). Des guerres civiles font rage entre diverses cités, en particulier entre Athènes et Sparte (guerres du Péloponèse). Cette époque marque l'apogée de la culture grecque classique en littérature et dans les arts. C'est aussi l'époque de Socrate, de Platon et d'Aristote.
3. Après -338, la Grèce entre sous domination macédonienne mais sa civilisation se répand dans tout l'Orient par les conquêtes d'Alexandre le Grand. Après la mort de ce dernier en -323, des royaumes grecs se partagent l'Orient (l'Égypte des Ptolémées, la Syrie des Séleucides) et des villes grecques s'épanouissent : Alexandrie en Égypte, Antioche, Pergame, etc. La langue grecque devient la langue de communication en Méditerranée.² C'est l'époque *hellénistique*, celle de l'apogée de la science antique.

¹*tyrannos* signifie "maître".

²le grec devint la langue commune, ou *koinè*.

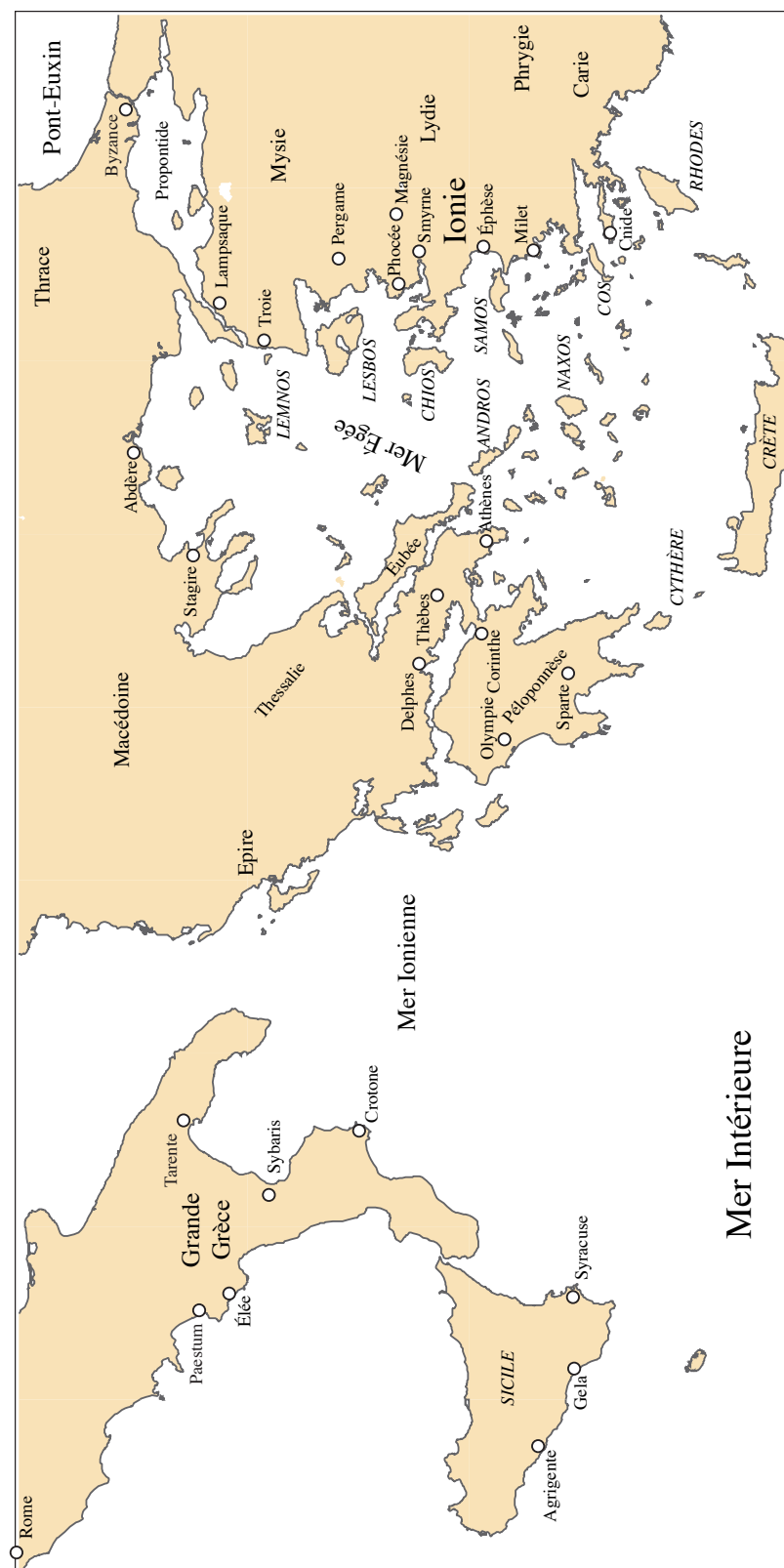


FIG. 2.1: Le monde grec.

4. Progressivement, à partir du II^e siècle, Rome conquiert tout le bassin méditerranéen, en raison probablement de sa culture politique et militaire supérieure. L'Égypte hellénistique devient une province romaine en -30. Le grec restera cependant la langue de communication en Méditerranée orientale jusqu'à la conquête arabe (VII^e siècle). Les Romains ont été complètement dominés par la culture grecque. Peuple éminemment pratique dominé par une aristocratie, ils ne se sont pas adonnés à la philosophie spéculative comme les Grecs l'ont fait et leur apport à la science est négligeable. La science entre alors dans une période de déclin.

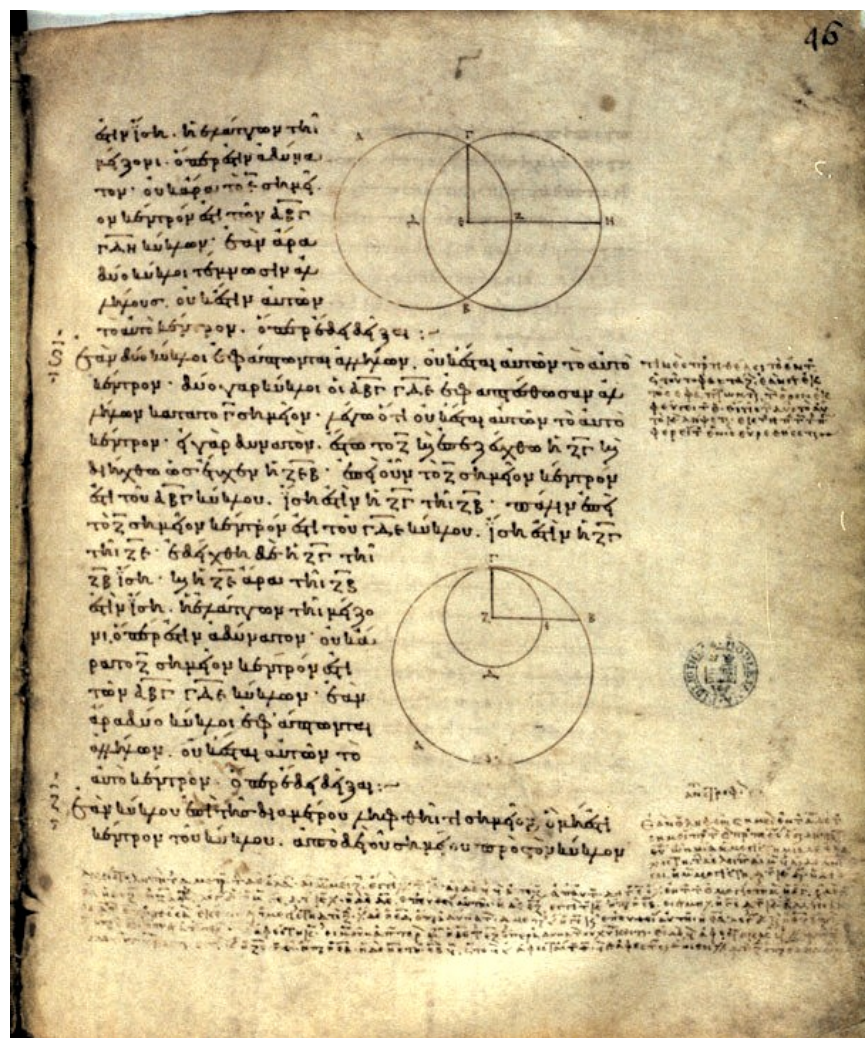


FIG. 2.2 : Une page tirée du plus vieux manuscrit complet existant des Éléments d'Euclide, datant de l'an 888.

2.1.2 Le problème des sources

Comment connaît-on la science grecque ? Premièrement par les oeuvres scientifiques et philosophiques qui sont parvenues jusqu'à nous. Ces oeuvres ont survécu dans des manuscrits copiés et recopiés à plusieurs reprises, car la durée de vie d'un manuscrit dans de bonnes conditions n'est que de quelques siècles. Les plus anciens manuscrits complets encore lisibles aujourd'hui datent d'environ mille ans.

Par exemple, le plus vieux manuscrit complet des Éléments d'Euclide date de 888, soit douze siècles après Euclide. Des fragments de l'oeuvre d'Euclide nous sont parvenus sur des bouts de manuscrits plus anciens,

mais on estime que leur totalité ne représente que 1% de l'oeuvre qui figure dans les manuscrits plus récents. Le plus ancien de ces fragments date environ du premier siècle de notre ère, soit trois siècles après Euclide.

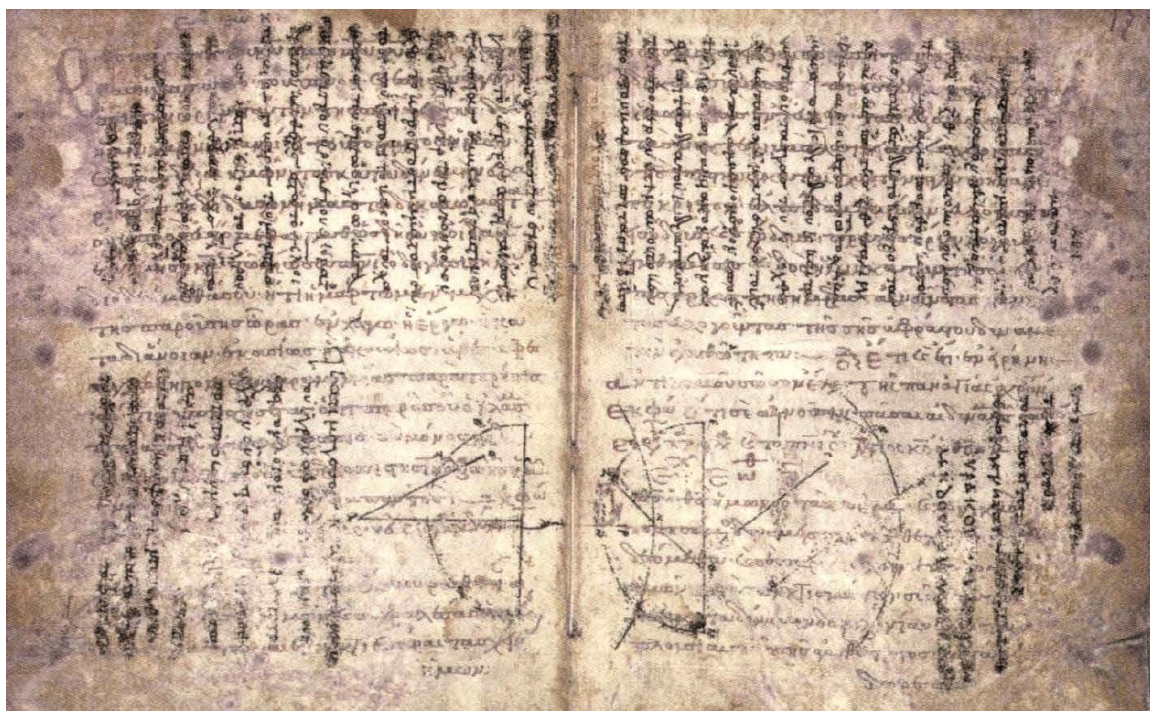


FIG. 2.3: Une page tirée du célèbre palimpseste d'Archimède (10e siècle).

Un autre exemple célèbre est celui du *palimpseste* d'Archimède, un manuscrit recopié au 10e siècle, puis recyclé au 12e siècle : les pages furent détachées, coupées en deux, en partie effacées et un livre de prières fut écrit par-dessus. Le manuscrit fut conservé dans cet état dans divers monastères ou églises orthodoxes jusqu'au début du 20e siècle. On reconnut alors sa valeur et un chercheur danois réussit à déchiffrer les oeuvres d'Archimède qui servait de trame de fond au livre de prières : l'une de ces oeuvre (*sur l'équilibre des corps flottants*) contient le célèbre principe d'Archimède et n'était connue auparavant que par une traduction en latin qui avait survécu séparément ; l'autre (*La méthode*) n'était tout simplement pas connue.

Ainsi, notre connaissance de la science et de la philosophie grecque est limitée par les oeuvres qui sont parvenues jusqu'à nous. Beaucoup d'oeuvres, qu'on peut présumer importantes, sont citées par plusieurs auteurs, mais sont perdues. Sauf découvertes relativement récentes, comme celle du palimpseste d'Archimède, les oeuvres qui sont parvenues jusqu'à nous sont connues depuis le bas moyen-âge. Ces oeuvres, aussi partielles soient-elles en rapport avec l'ensemble de la production de l'Antiquité, ont eu une influence capitale et déterminante sur la pensée moderne, en particulier sur la pensée scientifique.

2.1.3 Caractère de la science grecque

La philosophie grecque est caractérisée avant tout par une *souci d'intelligibilité* : on voulait comprendre les phénomènes en les insérant dans un *système*. Elle est aussi caractérisée par l'usage de raisonnements logiques (ou plausibles), mais en général très spéculatifs. Les Grecs sont avant tout d'excellents *dialecticiens*, c'est-à-dire qu'ils s'efforcent de convaincre leurs interlocuteurs. À l'époque de Socrate, plusieurs soi-disant philosophes, appelés *sophistes*, étaient des experts en persuasion qui vendaient leurs services et leurs connaissances et qui n'hésitaient pas à utiliser des raisonnements faux et trompeurs dans le seul but

de convaincre.³ Aujourd'hui encore, le mot *sophisme* désigne un raisonnement vicié, basé sur de fausses prémisses ou sur une confusion de sens. L'une des tâches principales des grands philosophes grecs sera l'assainissement de la logique et de la dialectique.

Il reste que les Grecs se distinguent nettement de leur prédécesseurs orientaux par ce goût de la philosophie spéculative et de la géométrie. Les Grecs sont les premiers véritables mathématiciens, en ce sens qu'ils concevaient les mathématiques pour elles-mêmes et non toujours en association avec un problème pratique. L'idéalisation et la capacité d'abstraction sont à l'honneur, le revers de la médaille étant un sens pratique moins développé et l'absence d'expériences, sauf à l'époque hellénistique. Si les observations soignées furent fréquentes (surtout chez Aristote et les astronomes), les Grecs ne firent pratiquement pas d'expériences scientifiques au sens où on l'entend de nos jours.

Nous diviserons la science grecque en trois périodes, correspondant aux époques (1) *archaïque*, (2) *classique* et (3) *hellénistique*. Les philosophes de la première époque sont qualifiés de *présocratiques*, parce que précédant Socrate (–470/–399).

Quelles sont les causes de l'essor de la science sous les Grecs ? Il est difficile de répondre à cette question et plusieurs opinions à ce sujet ont été formulées, sans qu'aucune ne soit entièrement satisfaisante :

1. On cite souvent une cause économique et sociologique : le commerce, l'artisanat et la navigation ont tenu une place prépondérante dans l'économie grecque, en particulier en Ionie. Les besoins techniques auraient alors stimulé les réflexions sur la Nature. Le défaut de cette explication est que la Grèce pré-hellénistique n'a pas fait preuve d'une plus grande innovation technique que l'Égypte à la même époque. D'autre part, la plupart des philosophes, tels Platon et Aristote, semblent avoir démontré un mépris relatif à l'égard des artisans et des activités manuelles en général.
2. Une autre explication avancée est l'utilisation par les Grecs d'une écriture alphabétique, contrairement aux Égyptiens. Ce type d'écriture s'apprend plus facilement et est donc plus largement répandu dans la population, au lieu d'être réservé à une classe de scribes. L'alphabétisation plus large aurait favorisé l'éclosion de la pensée abstraite. On peut alors se demander pourquoi cet essor scientifique ne s'est pas produit dans d'autres cultures alphabétiques, comme la Phénicie.
3. Une autre explication, qui peut être conjuguée à la précédente, tient au régime démocratique des Grecs, intimement lié à la petitesse des états grecs. Un tel régime entraîne de nombreux débats et favorise l'apprentissage de l'art de convaincre par des moyens rationnels (dialectique). Cette importance de la dialectique imprègne toute la littérature philosophique grecque, en particulier celle écrite sous forme de dialogue.
4. Une autre explication repose sur l'ouverture de la société grecque envers les autres cultures et les idées nouvelles, en particulier aux confins du monde grec, dans les colonies ioniennes et italiennes, où régnait un esprit d'initiative propre aux pays jeunes et nouveaux. C'est en effet dans ces jeunes colonies que les philosophes de l'époque présocratique sont les plus présents.
5. Enfin, une dernière explication, plus simpliste, repose sur le fait que les Grecs ont fini par dominer tout l'Orient ancien par les conquêtes d'Alexandre et qu'ils ont si efficacement assimilé et masqué les cultures scientifiques antérieures à la leur (Égypte et Mésopotamie) qu'on a tendance à exagérer leur originalité. Les historiens et doxographes grecs feraient preuve de chauvinisme en attribuant à d'anciens philosophes grecs des découvertes connues auparavant des Égyptiens et des Chaldéens.

2.2 Les présocratiques

2.2.1 Les premiers philosophes ioniens

Les premiers philosophes grecs connus n'habitaient pas la Grèce proprement dite, mais la périphérie du monde grec, notamment l'Ionie et l'Italie du sud. La ville de Milet était la plus importante d'Ionie et fut la

³Les sophistes étaient en quelque sorte les publicitaires de l'époque.

patrie de plusieurs philosophes de cette période. Les oeuvres écrites par ces philosophes, si elles ont jamais existé, ne nous sont pas parvenues. Nous ne connaissons leurs idées que par les commentaires ultérieurs d'autres philosophes (dont Aristote) ou de commentateurs appelés justement *doxographes*, dont Diogène Laërce, qui vivait au III^e siècle de notre ère.

La caractéristique principale des philosophes ioniens est leur *matérialisme* : ils proposent une explication des phénomènes naturels sans avoir recours à l'intervention des dieux, mais uniquement par le jeu naturel de la matière. Leurs théories, quoique floues et primaires, ne démontrent pas moins le besoin de comprendre l'Univers à partir d'un principe unificateur appelé *arkê* (ἀρχή), ou principe premier. Ils sont les inventeurs du concept de *Nature*, en grec *physis* (φύσις), en tant que distincte du monde surnaturel.

Thalès de Milet Le premier philosophe connu est THALÈS de Milet, l'un des "sept sages" de la Grèce antique. Il vivait au VII^e ou au VI^e siècle avant notre ère. Selon Diogène Laërce (ref. [24]),

Le premier il dessina la course du soleil d'un solstice à l'autre, et démontra que comparée au soleil, la lune en est la cent vingtième partie. C'est encore lui qui fixa à trente jours la durée du mois, et qui écrivit le premier traité sur la Nature... Il soupçonna que l'eau était le principe des choses, que le monde était animé et rempli de démons. On dit qu'il découvrit les saisons de l'année, et qu'il la divisa en trois cent soixante-cinq jours. Il ne suivit les leçons d'aucun maître, sauf en Égypte, où il fréquenta les prêtres du pays. A ce propos, Hiéronymus dit qu'il mesura les Pyramides en calculant le rapport entre leur ombre et celle de notre corps.

Thalès est réputé avoir prédit l'éclipse de Soleil de l'an -585, sur la base d'un cycle de répétition des éclipses connu des Chaldéens : le *Saros*, qui vaut 6585 jours (18 ans et 10 ou 11 jours). Ce cycle, cependant, n'indique que les possibilités de répétition d'éclipses et a été établi de manière empirique par les Chaldéens. On attribue aussi à Thalès la découverte des phénomènes électriques (électricité statique et aimantation). En géométrie, on lui attribue le théorème des proportions d'un triangle à la base de la triangulation, ainsi que le théorème stipulant qu'un rectangle inscrit dans un demi-cercle est nécessairement rectangle. On peut présumer que Thalès n'est pas l'auteur de ces théorèmes, mais qu'il les a empruntés aux Égyptiens.⁴

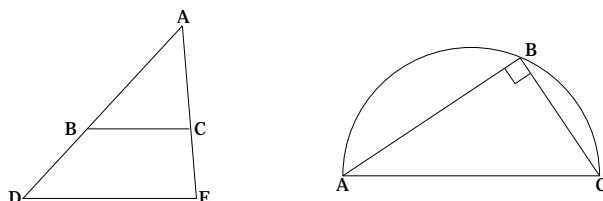


FIG. 2.4 : Illustration des deux théorèmes de géométrie plane attribués à Thalès de Milet. À gauche, le théorème des proportions : les rapports AB/AD et BC/DE sont égaux. À droite : un rectangle inscrit dans un demi-cercle est nécessairement rectangle.

Des Égyptiens aussi il s'inspira en affirmant que l'Univers n'est qu'une grande masse d'eau renfermant une bulle d'air hémisphérique, sur le fond de laquelle repose la terre ferme. Les tremblements de terre sont alors causés par les vagues de cette masse liquide, qui agitent la surface de la terre.

Anaximandre D'une génération plus jeune que Thalès, ANAXIMANDRE, aussi de Milet, en fut peut-être l'élève. Citons encore Diogène Laërce :

Il pensait que le premier principe était l'illimité, sans toutefois définir si c'était l'air, l'eau ou autre chose ; qu'il changeait en ses parties et pourtant restait immuable en son tout ; que la terre était placée au milieu du monde et en était le centre et qu'elle était sphérique ; que la lune ne donnait pas de lumière propre mais réfléchissait la lumière du soleil ; que le soleil était aussi grand que la terre, et qu'il était un feu absolument pur. Le premier il découvrit le gnomon, l'installa en cadrans solaires à Lacédémone pour marquer les solstices et l'équinoxe et construisit

⁴Règle générale, la prudence s'impose sur ce qu'on peut véritablement attribuer aux philosophes présocratiques, car la part du légendaire est non négligeable dans les sources qui s'y rattachent, et qui datent souvent de plusieurs siècles après cette période.

des horloges. Le premier aussi il décrivit le contour de la terre et de la mer et construisit la sphère.[24]

L'illimité, ou *απειρον*, est à l'origine de toutes les substances. Anaximandre conçoit l'Univers comme une...

...sphère de flammes qui entoure le froid, représenté par une terre dont toute la surface est couverte d'eau. Sous l'influence de la chaleur une partie de l'eau s'évapore et se change en air humide. Grâce à sa force expansive, l'air pénètre ensuite dans la sphère enflammée et la segmente en des anneaux dans lesquels le feu se trouve comprimé et devient invisible. Celui-ci, toutefois, peut s'échapper lorsqu'une ouverture a, par hasard, subsisté sur l'anneau ; fusant alors avec violence, il reprend sa consistance lumineuse et forme l'un des astres que nous voyons.[61]

Anaximène Dernier représentant de l'école de Milet et peut-être disciple d'Anaximandre, Anaximène croit que la matière primitive, l'*απειρον*, n'est autre que l'air, qui donne la terre et l'eau par condensation et le feu par raréfaction. Pour la première fois dans la pensée grecque, il introduit la notion de sphère des étoiles fixes : c'est la voûte étoilée, qui tourne autour de la terre et à l'intérieur de laquelle les autres astres (lune, soleil et planètes) flottent dans l'air.

En -494 la ville de Milet fut conquise par les Perses, ainsi que toute l'Ionie. À partir de cette date le centre de gravité de la philosophie grecque se transporte en Italie du sud.

2.2.2 Les Pythagoriciens

On sait peu de choses de PYTHAGORE, sinon qu'il naquit à Samos en -572 et qu'il émigra à Crotone, en Italie du sud, pour échapper au tyran Polycrate de Samos. Il fonda, à Crotone, une secte politico-religieuse, dont les disciples étaient soumis à une stricte discipline : interdiction de manger de la viande, des fèves, etc., plus quantité de gestes rituels qui semblent beaucoup plus relever de la superstition que de la philosophie. La secte de Pythagore exerça un contrôle temporaire sur Crotone, mais bientôt les habitants se révoltèrent contre un ordre aussi rigide et forcèrent l'exil de Pythagore à Métaponte, où il mourut vers -500.

Un disciple de Pythagore, PHILOLAOS (-470/ ?), quitta l'Italie pour la Grèce où il fonda une communauté pythagoricienne, pour ensuite retourner en Italie, en Sicile, dans la ville de Tarente. Philolaos nous a laissé un modèle de l'Univers : La Terre est sphérique. Tous les astres tournent autour d'un foyer central (Hestia), dans cet ordre : Antiterre (en opposition avec la Terre), Terre, Lune, Mercure, Vénus, Soleil, Mars, Jupiter, Saturne, étoiles fixes. Les distances entre les sphères des différents astres ont des proportions harmonieuses.

Le tyran-philosophe de Tarente, ARCHYTAS (-430/ - 348), appartient aussi à l'école pythagoricienne. Il est réputé l'inventeur de la mécanique mathématique et de dispositifs comme la vis, la poulie et le cerf-volant. Platon, séjournant à Tarente, y fut influencé par l'école pythagoricienne en général et par Archytas en particulier.

La doctrine pythagoricienne est assez vaste et mystérieuse, car elle ne devait être révélée qu'aux initiés. On sait qu'elle impliquait une croyance en la réincarnation des âmes (métempsycose). À la base de toutes choses, elle place les nombres et situe d'emblée les mathématiques au cœur de la philosophie. On peut même affirmer qu'elle impliquait une véritable mystique des nombres entiers et des proportions. Les pythagoriciens...

1. classifiaient les nombres entiers en nombres triangulaires, carrés, pentagonaux, etc. Ils associent également des nombres à la femme (2), à l'homme (3), à la justice (4) et au mariage (2+3=5).
2. connaissaient le théorème dit "de Pythagore", apparemment sans démonstration.
3. adoptèrent progressivement l'exigence d'une preuve dans l'étude des mathématiques.
4. intégraient la *musique* aux mathématiques. Le fait que les sons produits par des cordes vibrantes soient en rapport harmonieux lorsque les longueurs de ces cordes ont des rapports entiers (à tension et densité égales) avait une importance capitale pour eux. Ce fait tendait à démontrer que "les nombres sont les modèles des choses".

5. ont découvert l'existence de nombres irrationnels ($\sqrt{2}$), ce qui causa une crise dans leur mouvement. Une preuve par l'absurde fut justement utilisée pour démontrer le caractère irrationnel de $\sqrt{2}$: Supposons que $\sqrt{2}$ soit rationnel. Alors on peut l'exprimer comme a/b , où a et b sont des entiers sans facteur commun. Pour cette raison, a et b ne peuvent tous les deux être pairs. Il y a deux possibilités : (i) a est impair et (ii) a est pair (b est alors impair). En mettant au carré, on a $2b^2 = a^2$. Puisque le carré d'un nombre impair est impair et le carré d'un nombre pair est pair, le cas (i) est impossible, car a^2 serait impair et $2b^2$ serait pair. Le cas (ii) est aussi impossible, car alors on peut écrire $a = 2c$, où c est un entier, et donc $b^2 = 2c^2$. b^2 serait impair alors que $2c^2$ serait pair. Il n'y a pas de solution ; c'est donc que l'hypothèse de départ est fausse et qu'il n'existe pas deux entiers a et b tels que $\sqrt{2} = a/b$.

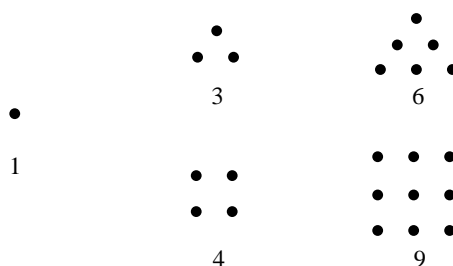


FIG. 2.5: Nombres triangulaires et carrés, selon les pythagoriciens.

2.2.3 Autres écoles philosophiques

Le Ve siècle avant notre ère est riche en activités philosophiques dans le monde grec. Citons premièrement PARMÉNIDE ($\sim -544/ \sim -450$), natif d'Élée, en Italie. Parménide distingue deux voies vers la connaissance : celle de la vérité, fondée sur la raison, et celle des apparences, fondée sur les sens. Cette distinction sera plus tard reprise par Platon. Parménide affirme qu'il faut se méfier de nos sens et que la raison est une voie plus sûre vers la connaissance. Le mérite de Parménide est de poser la question des fondements de la connaissance, bref, de l'épistémologie. Dans sa critique des philosophes ioniens, il réfuta même l'idée de changement, proposant que tout changement n'est qu'illusion, alors que la réalité fondamentale est immuable.

Un disciple de Parménide, ZÉNON ($\sim -490/?$), lui-aussi d'Élée, formula le célèbre paradoxe d'Achille et la tortue, dans le but de démontrer l'impossibilité logique du mouvement : Imaginons une course entre le guerrier Achille et une tortue, cette dernière ayant au départ une longueur d'avance. Selon Zénon, Achille ne peut dépasser la tortue, car le temps qu'il atteigne la position originale de la tortue, celle-ci a eu le temps de parcourir une distance supplémentaire, et le problème recommence à l'infini ! Évidemment, le raisonnement de Zénon est faux, car quoiqu'il envisage effectivement la somme d'une infinité d'intervalles de temps, ceux-ci tendent individuellement vers zéro. La notion de quantité infinitésimale n'étant pas alors bien définie, Zénon ne pouvait se rendre compte qu'il sommat en fait une série géométrique et qu'Achille rattrape sans peine la tortue. En fait, le paradoxe vise à démontrer que le temps et l'espace ne sont pas divisibles à l'infini ou, plus généralement, à démontrer que le mouvement, comme toutes les apparences, est trompeur, non intelligible.

Pour EMPÉDOCLE d'Agrigente ($-490/ -435$), le changement est possible, mais n'affecte pas les éléments premiers, qui sont au nombre de quatre : la *terre*, l'*eau*, l'*air* et le *feu*. Ces éléments se combinent suivant des principes d'attraction (amour) et de répulsion (haine) qui agissent en alternance et sont la source des changements multiples observés dans la nature. Cette théorie des quatre éléments, adoptée par la plupart des philosophes antiques, va perdurer jusqu'au XVIIe siècle.

S'opposèrent à la théorie des quatre éléments les philosophes LEUCIPPE et son disciple DÉMOCRITE d'Abdère ($-470/ -370$), appelés *atomistes*, car ils prétendaient plutôt que la matière est faite de particules éternelles et indestructibles appelées *atomes* (qui veut dire "insécable", en grec) : Il n'y a dans la nature que

des atomes et du vide. Les atomes se combinent au hasard pour former les objets qui nous entourent et les êtres vivants. La pauvreté de cette thèse est manifeste, d'autant plus qu'elle ne possède pas les éléments structurants de la théorie atomique moderne de Dalton, car tous les atomes sont a priori différents. Leur forme peut expliquer certaines de leurs propriétés : les aliments sucrés, par exemple, sont formés d'atomes arrondis, alors que les aliments acides contiennent des atomes pointus ! Les thèses atomistes seront reprises plus tard par le philosophe ÉPICURE (–341/ – 270), qui en fera l'un des fondements de sa philosophie et de son école.

2.3 La période classique

2.3.1 Platon et son école

Socrate Le Ve siècle avant notre ère – aussi appelé le “siècle de Périclès” – marque l'apogée de la culture grecque classique. C'est à cette époque que vivait l'Athénien SOCRATE (–470/–399), l'un des philosophes les plus connus de l'histoire. Socrate ne s'intéresse pas aux sciences pures ; il recommande même de ne pas s'y adonner car, selon lui, elles peuvent consumer la vie d'un humain sans lui apporter de bienfaits en retour. Il est vrai que Socrate a en tête les philosophies hautement spéculatives de ses prédécesseurs et que son point de vue est justifié dans son contexte. Par contre, Socrate s'intéresse beaucoup à l'Humain, à la morale et au processus de connaissance, à la raison. Socrate n'a pas écrit lui-même : l'essentiel de son oeuvre nous est connue par les *dialogues* de son disciple PLATON (–428/–348). Dans ces oeuvres, écrites sous forme de conversation entre Socrate et divers interlocuteurs – généralement des sophistes – qu'il cherche à convaincre ou à confondre, celui-ci tente de démontrer que l'être humain peut accéder à la connaissance de soi et au bonheur par l'usage de la raison. On a surnommé Socrate “l'accoucheur de la raison” en raison de sa méthode dialectique qui consiste à guider son interlocuteur vers une conclusion rationnelle plutôt que de lui exposer directement ses idées.

Platon Au contraire de Socrate, dont il est le plus important disciple, Platon s'intéresse au monde physique et aux moyens de le connaître. Ses conceptions à ce sujet sont décrites dans quelques-uns de ses dialogues, dont la *République*, les *Lois*, l'*Epinomis* et, surtout, dans le *Timée*. Ce dernier livre, qui moins que tous les autres prend la forme d'un dialogue, est peut-être le plus obscur et le plus difficile qu'il ait écrit. Platon est avant tout un idéaliste au sens fort du terme : il distingue le monde *sensible* (celui des sensations) du monde *intelligible* (celui des *idées*). Remarquons qu'en grec, *eidos* (εἶδος) peut se traduire à la fois par *idée* et par *forme*. Considérons par exemple un cercle. Toute figure circulaire qu'on peut dessiner ou observer est forcément imparfaite ; le cercle parfait est une *idée* et notre notion de “cercle” appartient au monde intelligible, alors qu'un cercle dessiné n'est qu'une imitation, en quelque sorte, de l'idée de cercle. Selon Platon, le monde des idées précède le monde sensible, c'est-à-dire que les sensations procèdent des idées. L'immuabilité des idées fournit à la science un objet stable que le monde sensible, en perpétuel changement, ne peut offrir. Cette conception est souvent exprimée par le mythe de la *caverne* : les humains sont comme enchaînés dans une caverne et ne perçoivent les événements du dehors que par l'ombre que ceux-ci projettent au fond de la caverne ; autrement dit : nous ne connaissons la réalité profonde que par l'intermédiaire des phénomènes sensibles qui n'en sont qu'un pâle reflet.

Platon ne peut s'intéresser aux phénomènes physiques terrestres, trop éphémères pour être dignes d'intérêt. Il accorde cependant une grande importance à l'étude de la géométrie et des astres. En ceci il a été fortement influencé par l'école pythagoricienne. On raconte qu'il voulut apposer l'inscription “Que nul n'entre ici s'il n'est géomètre” à la porte de son école, l'*Académie*. Platon associait à chacun des 4 éléments d'Empédocle un polyèdre régulier : le tétraèdre au feu, le cube à la terre, l'octaèdre à l'air et l'icosaèdre à l'eau. Ainsi, les propriétés (ou qualités) des substances étaient réduites à des formes géométriques. On remarque ici la forte tendance idéaliste et l'importance de la géométrie, que Platon tient des pythagoriciens.

Notons que les trois problèmes classiques de la géométrie grecque font leur apparition à cette époque :

1. La quadrature du cercle : comment, avec règle et compas, tracer un carré qui a la même surface qu'un cercle donné. Cette construction géométrique, que tant de géomètres ont cherchée pendant des siècles,

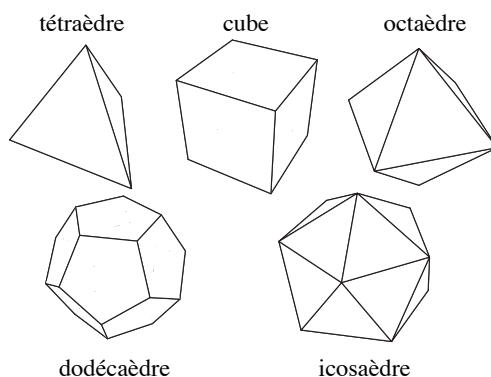


FIG. 2.6: Les cinq polyèdres réguliers, dits *solides platoniciens*.

est en fait impossible.

2. La duplication du cube : comment, avec règle et compas, construire un segment de longueur $\sqrt[3]{2}$. Les solutions qu'on y a trouvées dans l'Antiquité (dont celle d'Archytas de Tarente) vont toutes au-delà de la géométrie plane et donc ne peuvent être effectuées par règle et compas.
3. La trisection de l'angle : comment diviser un angle en trois angles égaux. Encore une fois, la solution à ce problème va au-delà de la géométrie plane et nécessite la considération de courbes définies dans l'espace, telles les coniques.

2.3.2 Eudoxe de Cnide

Rattaché à l'école de Platon est EUDOXE de Cnide (v.-406/v.-355), considéré comme l'un des plus grands mathématiciens de l'antiquité. La principale contribution d'Eudoxe aux mathématiques est l'introduction du concept de 'grandeur'. Rappelons que les pythagoriciens considéraient les nombres comme la source de toutes choses. Les nombres étaient soit entiers ou rationnels. La difficulté est alors d'établir une correspondance entre des longueurs géométriques et des nombres rationnels, ce qui n'est pas toujours possible. Eudoxe abandonne simplement l'idée de trouver une telle correspondance et ne traite que de grandeurs géométriques (longueurs, aires et volumes). Des problèmes qui auraient pu être traités de manière algébrique ou arithmétique sont désormais exprimés en langage purement géométrique. Cette attitude, quoique fructueuse du temps des Grecs, consacre un certain divorce entre arithmétique et géométrie, qui ne sera résorbé qu'avec l'avènement de la géométrie analytique au XVII^e siècle et, plus complètement, par une définition rigoureuse du concept de nombre réel au XIX^e siècle.

Eudoxe est l'inventeur de la *méthode des exhaustions*, une technique de construction géométrique qui anticipe le calcul différentiel et intégral. Grâce à cette méthode, Eudoxe démontre que :

1. Le rapport des surfaces de deux cercles est le carré du rapport de leurs rayons.
2. Le rapport des volumes de deux sphères est le cube du rapport de leurs rayons.
3. Le volume d'une pyramide est le tiers de celui d'un prisme ayant la même base et la même hauteur.
4. Le volume d'un cône est le tiers de celui d'un cylindre ayant la même base et la même hauteur.

Cette méthode sera plus tard utilisée par Archimède, entre autre dans le calcul du nombre π .

Eudoxe est aussi connu pour sa théorie des *sphères homocentriques* en tant que système du monde. Le but d'Eudoxe était de construire une représentation mathématique (géométrique) du mouvement des planètes qui puisse *sauver les apparences*, c'est-à-dire prédire les positions observées des planètes. L'utilisation des mathématiques pour décrire le mouvement d'objets réels, la construction d'un modèle mathématique, est une innovation extrêmement importante dans l'histoire des sciences et le mérite en revient à Eudoxe. Dans

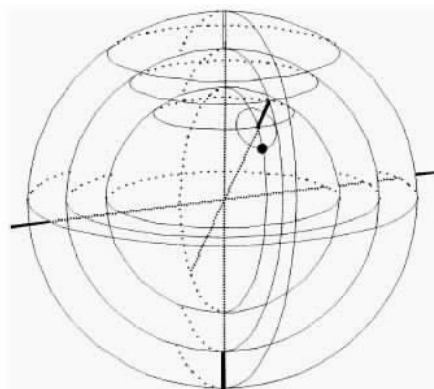


FIG. 2.7: Schéma des sphères homocentriques d'Eudoxe

son système, la Terre est immobile. Chaque astre est attaché à une sphère en rotation uniforme centrée sur la Terre. Cependant, pour expliquer les irrégularités dans le mouvement des planètes et de la Lune, Eudoxe suppose que les sphères peuvent être fixées à d'autres sphères ayant des axes différents, de sorte que le mouvement apparent d'une planète est une combinaison de mouvements circulaires selon des plans différents. Seules les étoiles fixes n'ont besoin que d'une seule sphère (pour une raison aujourd'hui évidente : la Terre tourne sur elle-même). Les autres astres ont besoin de plusieurs sphères pour expliquer leur mouvement apparent : 3 sphères pour la Lune, 3 pour le Soleil, 4 pour chacune des planètes, soit 27 sphères en tout. Ce système sera plus tard raffiné par d'autres astronomes qui y ajouteront des sphères supplémentaires. Il est en opposition avec le système de Ptolémée, qui utilise plutôt les excentriques et les épicycles pour décrire le mouvement des planètes.

Les sphères d'Eudoxe faisaient partie d'un modèle mathématique et ne constituaient pas, dans l'opinion d'Eudoxe, une réalité physique. Plus tard, au moyen-âge, la distinction entre un modèle mathématique et la réalité physique sera perdue, et on supposera que ces sphères sont des réalités physiques, faites de cristal pour expliquer leur transparence. On a aussi prétendu – c'est une idée attribuée aux Pythagoriciens – que le glissement des sphères les unes sur les autres produit un son mélodieux que la plupart des gens ne peuvent entendre, car ces sons sont omniprésents depuis notre naissance et l'oreille s'y est si habituée qu'elle ne les entend plus ; seule une oreille attentive et réceptrice peut entendre cette "musique des sphères".

Notons qu'aucune oeuvre d'Eudoxe ne nous est parvenue. C'est par les commentaires et citations d'autres auteurs que l'on attribue à Eudoxe ce qui précède.

2.3.3 Aristote

ARISTOTE (-384/-322) fut un disciple de Platon.⁵ Il fonda sa propre école à Athènes (en concurrence avec l'Académie) qui fut appelée *Lycée*, en raison de son emplacement sur un site consacré à Apollon Lycien. L'école d'Aristote est qualifiée de *péripapéticienne*, car Aristote donnait souvent ses cours en marchant en compagnie de ses étudiants. Après la mort d'Aristote, son école fut dirigée par Théophraste (-322/-287), puis par Straton (-286/-270) et par Lycon (-270/-228). Sous Théophraste, le Lycée aurait compté jusqu'à deux mille étudiants.

Aristote a laissé de nombreux traités, mais il est possible que certains d'entre eux soient des oeuvres collectives (de son école) ou au moins des notes de cours recueillies par ses étudiants. On cite presque deux cents livres écrits par Aristote ; le nombre de livres qui nous sont parvenus est beaucoup moindre, mais quand même considérable. Plusieurs traités sont consacrés aux questions politiques, poétiques et métaphysiques. Les traités qu'on peut qualifier de "scientifiques" sont les suivants :

⁵ Il fut aussi le précepteur d'Alexandre le Grand, ce qui lui causa des ennuis à la mort de celui-ci.

1. Les traités de *logique* ou *Organon*, comprenant :
 - (a) Les *Catégories*.
 - (b) Les *Analytiques*.
 - (c) Les *Topiques*.
 - (d) La *Réfutation des sophistes*.
2. Les traités de *physique*, comprenant :
 - (a) La *Physique* (8 livres), traitant du mouvement.
 - (b) *De la génération et de la corruption* (2 livres), traitant des éléments et de leurs transformations.
 - (c) Du ciel (5 livres), traitant de l'astronomie.
 - (d) Les *Météorologiques* (4 livres) traitant des phénomènes aériens du monde sublunaire.
3. Les traités d'*histoire naturelle*, comprenant :
 - (a) *L'histoire des animaux* (10 livres).
 - (b) *Les parties des animaux* (4 vol.).
 - (c) *La génération des animaux* (5 vol.).
 - (d) *De l'Âme*.
 - (e) *Du mouvement des animaux*.
 - (f) *Petits traités d'histoire naturelle*

C'est le onzième *scolarque* du Lycée, ANDRONICOS de Rhodes, qui rassembla, classa et édita, vers –60, les “notes de cours” utilisées au Lycée. Dans cette édition, il plaça les oeuvres touchant la “philosophie première” après les oeuvres touchant la physique, d'où le nom *métaphysique* qui leur est resté (l'adverbe *meta* (μετα) signifie *après*). Plusieurs philosophes, depuis Andronicos, sont connus par leurs commentaires sur l'oeuvre d'Aristote : Nicolas de Damas (vers –40/ – 20), Alexandre d'Aphrodise (début III^e siècle), Thémistius (IV^e siècle), Jean Philopon (Ve siècle), Simplicius (VI^e siècle), Maïmonide (1135/1204), Averroès (1126/1198), Saint-Thomas d'Aquin (1227/1274), etc. Aristote est le philosophe antique le plus commenté et le plus influent par la suite. Son influence sera prédominante dans les universités occidentales jusqu'au XVII^e siècle.

Caractère de l'oeuvre d'Aristote Selon Aristote, il faut distinguer les connaissances sensibles (c.-à-d. fournies par nos sens) des connaissances vraiment scientifiques, obtenues par une suite de définitions et de démonstrations. En ce sens, Aristote est platonicien. Cependant, à la différence de Platon, Aristote admet que les idées soient partiellement accessibles par les sens. *L'observation* est donc très importante pour Aristote et est la source de toute connaissance. Les mathématiques (la géométrie) ne sont pas la science incontournable, mais un *outil*, un langage. Platon ne pouvait s'intéresser aux objets du monde sublunaire, corruptibles et non permanents. Au contraire, Aristote est le fondateur de l'histoire naturelle (biologie) et y consacre au moins le quart de ses traités. Aristote apparaît *a posteriori* comme le premier véritable scientifique connu.

Cette différence d'attitude entre Platon et Aristote a été immortalisée par Raphaël dans son célèbre tableau *l'École d'Athènes*, effectué au Vatican en 1509 pour le pape Jules II. Au centre de ce tableau on voit Platon et Aristote marchant et conversant. Platon lève un doigt vers le ciel pour affirmer le caractère primordial des idées, alors qu'Aristote étend sa main à l'horizontale, pour rappeler à son interlocuteur que c'est le monde sensible qui est l'objet de la science et que celui-ci n'est pas complètement séparé du monde intelligible.⁶

La physique d'Aristote La physique d'Aristote comporte les éléments suivants :

1. Les quatre éléments d'Empédocle, tous des aspects d'une substance première.
2. Quatre qualités fondamentales (le chaud, le froid, le sec et l'humide) agissent sur la matière première par combinaisons non contraires pour donner les quatre éléments :

⁶Ce tableau est reproduit sur la page Web du cours.

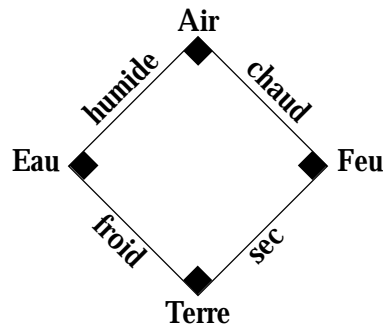


FIG. 2.8: Les éléments et les qualités fondamentales chez Aristote.

- (a) Eau : froid et humide.
 - (b) Air : chaud et humide.
 - (c) Terre : froid et sec.
 - (d) Feu : chaud et sec.
3. Les éléments peuvent se transformer l'un dans l'autre, de manière cyclique (une qualité changeant à la fois).
 4. Les combinaisons d'éléments différents sont de trois types :
 - (a) *Synthesis* (συνχέσις) : mélange mécanique.
 - (b) *Mixis* (μῖξις) : l'analogue de nos combinaisons chimiques.
 - (c) *Krasis* (κράσις) : l'analogue de nos solutions.
 5. Un cinquième élément (*quintessence* ou *éther*) se trouve dans le monde céleste (par opposition à sublunaire). Chez Platon, il correspond au dodécaèdre.
 6. L'Univers est unique, limité et sphérique. Les sphères concentriques sont, dans cet ordre :
 - (a) La Terre immobile
 - (b) La sphère de l'eau.
 - (c) La sphère de l'air.
 - (d) La sphère du feu.
 - (e) Les sphères célestes : Lune, Soleil, Mercure, Vénus, Mars, Jupiter, Saturne, étoiles fixes.
 - (f) Au-delà de la sphère des fixes, c'est le néant : il n'y a même pas d'espace.
 7. La notion de mouvement ou *kinesis* (κίνησις) englobe tout type de changement :
 - (a) Altération de la substance d'un objet.
 - (b) Dilatation et contraction.
 - (c) Changement de qualité fondamentale.
 - (d) Translation, ou *phora* (φορα).
 8. Le monde céleste ne connaît que le mouvement circulaire uniforme. Le monde sublunaire connaît trois types de mouvement de translation :
 - (a) Le mouvement *naturel* : chaque élément tend à rejoindre sa sphère. Le feu monte, la terre descend.
 - (b) Le mouvement *violent* : un objet peut subir l'influence d'une force et se déplacer de manière non naturelle tant que cette force est appliquée.
 - (c) Le mouvement *volontaire*, effectué par les humains et les animaux.

- (d) En langage moderne, la vitesse v d'un objet est proportionnelle à la force appliquée F , divisée par la résistance R du milieu : $F = Rv$. Cette loi du mouvement est en fait correcte pour les vitesses terminales dans les milieux visqueux, mais ignore complètement la phase d'accélération. De cette loi, Aristote déduit que le vide est impossible, car la résistance du vide serait nulle, ce qui impliquerait une vitesse infinie, notion absurde. Si le vide n'existe pas, alors les atomes n'existent pas non plus et donc la matière est divisible à l'infini.

On constate que ce système possède une certaine cohérence, ce qui explique son immense popularité, jusqu'au XVIII^e siècle.

L'histoire naturelle d'Aristote Aristote a observé 495 espèces animales et a élaboré un système taxinomique simple :

1. Les animaux à sang rouge (enaima) :
 - (a) Les quadrupèdes vivipares.
 - (b) Les quadrupèdes ovipares.
 - (c) Les oiseaux (classifiés selon leur nourriture et leurs pattes).
 - (d) Les poissons.
2. Les animaux dépourvus de sang rouge (anaima) :
 - (a) Les animaux à corps mous (céphalopodes).
 - (b) Les animaux à écailles (crustacés).
 - (c) Les animaux à coquilles (mollusques).
 - (d) Les insectes et les vers.

Les niveaux taxinomiques énumérés ci-haut sont les *grands genres*. Aristote a aussi utilisé les *genres* et les *espèces*. Selon Aristote, "la Nature ne fait rien en vain" : Les animaux ont les organes dont ils ont besoin. La génération spontanée est possible pour les formes inférieures de vie.

On peut affirmer qu'Aristote a procédé à des observations méthodiques et qu'il a fait preuve d'un sens critique élevé. Le principal mérite de la science aristotélicienne est d'être *grosso modo* en accord avec les observations les plus courantes. Par contre, Aristote sera généralement dépassé par une science hellénistique supérieure. Ce n'est que plus tard, après le déclin de la science grecque, que son influence sera dominante.

2.4 La médecine grecque classique

La médecine des temples Pendant la période classique, deux types de médecine s'opposent en Grèce : la médecine des temples et celle des différentes écoles de médecine. La première est une pratique magique, florissante en Grèce au moment même de la naissance de la philosophie et de la science rationnelle. Il est possible qu'elle ait été importée d'Égypte, ou du moins fortement influencée par Elle. Même Platon, dans ces dialogues, la considère comme une forme valable de médecine.

En quoi consiste-t-elle ? Le malade devait se rendre dans un centre spécial, entourant un temple du dieu grec de la médecine, *Asclépios*.⁷ Le malade subissait un traitement rituel, consistant en un bain suivi d'une période de repos, appelée *incubation*, au cours de laquelle le malade rêvait. Ses rêves étaient ensuite interprétés par les prêtres d'Asclépios, qui établissaient un pronostic. En fait, le malade pouvait espérer voir sa propre guérison (ou les moyens de l'atteindre) en songe.

La médecine des temples ne faisait que peu appel aux drogues et ne pratiquait pas du tout la chirurgie. En fait, le traitement était essentiellement psychologique et le repos en était un élément essentiel.

Par ailleurs, comme en Égypte et indépendamment de la médecine des temples, existaient des herboristes (les *rhizotomoi* ou "cueilleurs de racines") qui préparaient une foule de remèdes traditionnels. Leur pratique n'est pas seulement empirique, mais teintée de croyances magiques. En particulier, ils croyaient que

⁷Esculape pour les Romains

certaines plantes devaient être cueillies à des périodes particulières du cycle lunaire, en prononçant certaines formules ou incantations.

Les écoles de médecine Parallèlement à la médecine des temples – et en opposition avec elle – existaient des écoles de médecine. Mentionnons les quatre écoles principales à l'époque pré-classique :

1. L'école pythagoricienne, dont le principal représentant fut ALCMÉON de Croton. Selon cette école, la santé est le résultat d'un équilibre de différentes forces à l'intérieur du corps.⁸ Les pythagoriciens avaient déjà identifié le cerveau comme le centre des sensations.
2. L'école sicilienne, représentée par Empédocle d'Agrigente (plus connu pour sa théorie des quatre éléments). Empédocle a introduit la notion (a posteriori stérile) de *pneuma*, ou "souffle de vie", qui pénètre le corps par les poumons. Il propose aussi un mouvement de va-et-vient du sang entre le cœur et les veines, une idée qui ne sera définitivement oubliée qu'avec les travaux de William Harvey sur la circulation unidirectionnelle du sang au XVII^e siècle.
3. L'école ionienne, où l'on pratiquait un peu la dissection.
4. L'école d'Abdère, où l'on insistait beaucoup sur les conditions de la santé : gymnastique et diététique.

Avec le temps, deux écoles principales survécurent : l'école de *Cnide* et l'école de *Cos*, situées géographiquement très près l'une de l'autre. L'école de Cnide accordait une grande importance aux observations (par exemple on y pratiquait l'auscultation des poumons), mais était réticente à la théorie. À Cos, au contraire, on insistait sur l'importance de la théorie et du raisonnement : la médecine de Cos est la première médecine véritablement scientifique, bien que ses théories nous paraissent aujourd'hui bien naïves.

Le représentant le plus illustre de l'école de Cos est HIPPOCRATE (–460/ – 377) . Les oeuvres d'Hippocrate et de ses disciples forment ce qu'on appelle le *corpus hippocratique* et furent extrêmement influentes jusqu'à la Renaissance. On peut justement considérer Hippocrate comme le père de la médecine scientifique, en raison de sa prudence, de sa méfiance à l'égard des pratiques magiques, de la consignation précise qu'il fit de ses traitements et de leurs résultats, négatifs comme positifs. Les médecins de Cos élaborèrent des théories sur le fonctionnement du corps humain, dont la théorie des humeurs, mais ne leur accordait pas de valeur absolue et acceptaient que ces théories ne pouvaient pas tout expliquer. Cette attitude prudente reste pertinente encore dans la médecine actuelle, étant donnée la complexité du corps humain.

Hippocrate pense que le meilleur remède à une maladie est le système de défense du malade lui-même, ou encore la vertu guérissante de la nature (*vis medicatrix naturæ*, en latin). Le rôle du médecin consiste principalement à identifier le mal et les conditions les plus propices à la guérison naturelle du patient, mais il est clair que le gros du travail doit être fait par l'organisme lui-même. Chaque maladie doit suivre son cours et l'environnement du malade (le réconfort de ses proches tout comme les médicaments) doit l'aider à surmonter la crise qui survient à un certain stade de l'évolution du mal, au-delà duquel le malade est soit condamné, soit sauvé.

La théorie des humeurs L'une des théories les plus influentes de l'école de Cos est la théorie des humeurs,⁹ selon laquelle le corps humain comporte principalement quatre types de liquides, qui doivent exister en proportions équilibrées afin que l'individu reste en bonne santé :

1. Le *sang*, associé au "sec" et produit par le foie.
2. La *pituite*, ou *flegme*, ou *lymphe*, élément principal du mucus nasal, associée à l'"humide" et produite par les poumons.
3. La *bile*, associée au "chaud" et produite par la vésicule biliaire.
4. L'*atrabile* ou *bile noire*, associé au "froid" et produite par la rate.

Les maladies sont causées par un déséquilibre des différentes humeurs et le traitement doit tenter de rétablir cet équilibre. Plus tard, Galien (voir plus bas) a élaboré une théorie des tempéraments associés aux différentes humeurs, théorie qui vaut la peine d'être mentionnée en raison de sa longévité. Selon Galien, les tempéraments humains existent en quatre types, selon l'humeur dominante de chaque individu :

⁸En fait, ce principe est formulé de manière si floue qu'il est encore exact aujourd'hui !

⁹Le mot *humeur* est utilisé ici dans son sens premier, celui de liquide.

1. Le type sanguin, chaleureux et aimable.
2. Le type flegmatique, lent et calme.
3. Le type colérique ou bilieux, prompt et emporté.
4. Le type mélancolique ou atrabilaire, triste et renfermé.

Notons que le langage courant possède des reliques de cette ancienne théorie, dans les expressions suivantes : “être de mauvaise humeur”, “se faire de la bile” ou “du mauvais sang”, “se dilater la rate”, etc.

2.5 La période hellénistique

À l’époque d’Aristote, la Grèce tombe sous la domination du royaume de Macédoine et de son roi Philippe II. Le fils de celui-ci, Alexandre, forme le projet audacieux de conquérir l’empire perse. De –334 à –327, il s’empare de tout l’empire perse (incluant l’Égypte) et va même au-delà, se rendant jusqu’au fleuve Indus (Pakistan actuel). Au cours de ses conquêtes, il fonde un grand nombre de villes (au moins 17) qu’il appelle toutes Alexandrie ! La plus connue est bien-sûr celle qu’il fonde à l’extrémité ouest du delta du Nil, sur la Méditerranée. Après sa mort prématurée, son empire est partagé entre ses généraux, les *diadoques*¹⁰ : Séleucos hérite de l’Asie, Antigone de la Macédoine et de la Grèce et Ptolémée Sôter de l’Égypte. L’adjectif *hellénistique* désigne la période des trois derniers siècles avant notre ère pendant laquelle la culture grecque s’est imprégnée en Orient, après les conquêtes d’Alexandre. En contrepartie, les influences orientales, en particulier religieuses, se firent sentir en Occident. Politiquement, la période hellénistique fut encombrée des guerres que se livrèrent les diadoques et se termina par la conquête romaine du monde grec, s’achevant par la bataille d’Actium en –30.

Par le brassage d’idées, de cultures et de religions qui s’y déroula, cette période cosmopolite est celle de l’Antiquité qui ressemble le plus à notre monde moderne. C’est à cette époque, plus précisément entre –300 et –150 que la science antique connut son apogée. Il fallut attendre le XVII^e siècle avant que le niveau de la science occidentale atteigne celui de la science hellénistique.

Alexandrie et le Musée Même si Alexandre est le fondateur officiel d’Alexandrie d’Égypte, il ne fit qu’ordonner sa construction, sur un site judicieusement choisi pour la qualité de son port et de ses liens fluviaux avec le Nil. Les véritables constructeurs de la ville furent les deux premiers rois lagides : Ptolémée I Sôter (roi de –323 à –285) et Ptolémée II Philadelphe (de –285 à –247).¹¹ Alexandrie fut non seulement la capitale du royaume d’Égypte, mais la métropole effective du monde grec et des sciences jusqu’au Ve siècle de notre ère, c’est-à-dire pendant sept siècles.

Ptolémée I est le fondateur du *Musée*,¹² institut culturel et scientifique inspiré du Lycée d’Aristote, mais à plus grande échelle : le Musée comportait des promenades, des salles de cours, des cellules (bureaux), un observatoire, des salles de dissection, des logements et même un jardin zoologique. Le Musée était flanqué d’une immense *bibliothèque*, qui a compté plusieurs centaines de milliers de volumes (sous forme de rouleaux de papyrus). Cette institution était entretenue par les rois (en particulier par Ptolémée II qui continua l’œuvre de son père) et ensuite par les empereurs romains. Les savants (environ une centaine) recevaient un salaire de l’État.¹³

Plus qu’un édifice, le Musée était un regroupement de savants, attirés à Alexandrie par le patronage de Ptolémée I, qui considérait à juste titre que la richesse de son royaume serait vaine si elle ne permettait pas le développement (ou du moins l’entretien) des arts et des sciences. Ptolémée I y attira les savants, en particulier Démétrius de Phalère, Straton de Lampsaque et Euclide. DÉMÉTRIUS de Phalère, philologue et fondateur *de facto* de la bibliothèque, fut le premier directeur du Musée et peut être l’instigateur de sa construction. Plus important pour la science fut le rôle de STRATON de Lampsaque (mort en –268), élève

¹⁰Diadochoi (διδάδοχοι) veut dire “successeurs”.

¹¹L’adjectif *lagide* réfère à la dynastie des Ptolémée. Le père de Ptolémée I s’appelait *Lagos*.

¹²*Mouseion* (Μουσείον) veut dire “temple des Muses”. Cette appellation traduit le caractère littéraire et artistique qu’avait initialement le Musée.

¹³Pour plus de renseignements sur Alexandrie et ses institutions, voir [68].

de Théophraste et nommé précepteur du prince héritier (le futur Ptolémée II). Straton passa de longues années à Alexandrie et donna au Musée son orientation scientifique avant de retourner à Athènes diriger le Lycée, de –286 à sa mort. Aristote s'étant déjà distancé de Platon en affirmant l'importance de l'observation dans l'édifice des connaissances, Straton pousse plus loin cette tendance et consacre un certain divorce entre la philosophie et ce qu'on peut désormais appeler la science. D'ailleurs, la métaphysique ne fut pas encouragée au Musée.

La prospérité scientifique d'Alexandrie dura environ 150 ans. Les rois Ptolémée III Évergète (de –247 à –222) et Ptolémée IV Philopator (de –222 à –205) furent encore assez puissants pour stimuler les progrès scientifiques et techniques, mais la puissance des rois lagides déclina rapidement. En particulier, Ptolémée VIII (dit Évergète II), suite à une lutte de pouvoir où il était soutenu par Rome, semble avoir momentanément persécuté la communauté grecque d'Alexandrie et causé une dispersion des savants vers –145. Cette date marque la fin de l'âge d'or de la science hellénistique.

Nous allons passer en revue quelques-unes des figures marquantes de cette époque exceptionnelle.

2.5.1 Mathématiciens et mécaniciens

Euclide Euclide a vécu à Alexandrie au début du III^e siècle avant notre ère. De tous les géomètres de l'Antiquité, il est celui qui a le plus profondément influencé la postérité. Son oeuvre principale, les *Éléments*, comporte 467 théorèmes répartis en 13 livres divisés comme suit :

1. Livres I à IV : géométrie plane.
2. Livres V et VI : la théorie des proportions et ses applications.
3. Livres VII à IX : la théorie des nombres entiers.
4. Livre X : les nombres irrationnels.
5. Livres XI à XIII : géométrie de l'espace (polyèdres, etc.).

Cette oeuvre a fait autorité en matière de géométrie jusqu'au XIX^e siècle et est encore utilisable de nos jours, ce qui est une marque incontestable de sa qualité et de sa profondeur.¹⁴

L'apport principal d'Euclide est la *méthode axiomatique*, c'est-à-dire la construction d'un ensemble de propositions mathématiques obtenues à partir d'un nombre fini de postulats à l'aide de raisonnements logiques rigoureux. En cela, Euclide est le véritable fondateur des mathématiques.

Le premier livre d'Euclide contient un ensemble de définitions (point, droite, angle, etc.) ainsi que cinq **postulats**, qui forment la base de la géométrie :

1. On peut tracer une droite d'un point quelconque à un autre.
2. On peut prolonger tout segment de droite en une droite infinie.
3. On peut tracer un cercle de centre et de rayon quelconques.
4. Tous les angles droits sont égaux entre eux.
5. Si deux droites sont coupées par une troisième et que la somme des angles intérieurs coupés par cette dernière, du même côté, est inférieure à deux angles droits, alors les deux premières droites se reconstruiront de ce côté.¹⁵

La plus grande partie des *Éléments* est en fait une théorie des objets qu'on peut construire à l'aide de règles et de compas idéaux. La construction géométrique par règle et compas est l'outil quantitatif essentiel des mathématiques grecques, par opposition à l'algèbre ou au calcul arithmétique. Les quantités mathématiques considérées par Euclide sont les grandeurs (concept introduit par Eudoxe), les entiers et les rapports d'entiers ou de grandeurs.

¹⁴Un site INTERNET est consacré aux éléments d'Euclide, en contient le texte complet ainsi que des commentaires et des exemples animés : <http://aleph0.clarku.edu/~djoyce/java/elements/elements.html>

¹⁵On a longtemps conjecturé que le cinquième postulat pouvait être déduit des quatre premiers, sans pouvoir le démontrer. En fait, il a été démontré que ce postulat est indépendant lorsqu'on a construit des géométries non euclidiennes qui ne le contenaient pas (Lobatchevsky en 1826, Bolyai en 1831).

Il est intéressant de noter que les *Éléments* comportent, à leur début, une suite de “définitions” d’objets géométriques primordiaux (point, droite, etc.). Ce besoin de définir ainsi des concepts fondamentaux est une faiblesse aux yeux de l’axiomatique moderne, mais une analyse philologique récente [66] prétend y voir un ajout effectué par des commentateurs ultérieurs, ce qui rehausse encore la valeur de l’oeuvre originale d’Euclide.

Pratiquement rien n’est connu de la vie d’Euclide. On ignore les années de sa naissance et de sa mort, mais on sait qu’il rédigea ses *Éléments* sous le règne de Ptolémée I. Celui-ci lui aurait demandé, selon la légende, s’il y avait une façon plus courte de connaître la géométrie, sans avoir à étudier les *Éléments*, ce à quoi Euclide aurait répondu : “il n’y a pas de voie royale à la géométrie”, expression devenue proverbiale exprimant le fait que toute connaissance approfondie est le fruit d’un labeur inévitable.

Une autre anecdote démontre l’attachement d’Euclide à la connaissance désintéressée : l’un de ses élèves, après avoir commencé l’étude des *Éléments* et être parvenu laborieusement au premier théorème, se serait exprimé : “mais que vais-je gagner à apprendre tout cela ?” Euclide aurait alors dit à l’un de ses esclaves : “Donne-lui une obole, puisqu’il doit gagner quelque chose pour apprendre...”

Archimède Archimède (–287/–212) a passé le gros de sa vie à Syracuse, en Sicile, bien qu’il ait étudié à Alexandrie. Il était géomètre et mécanicien et excellait à la fois dans les sciences théoriques et pratiques.

1. En mathématiques, Archimède est considéré comme un précurseur du calcul intégral, par son utilisation fréquente de la *méthode des exhaustions* dans le calcul des aires, des volumes ou des longueurs de courbes (la méthode elle-même remonte à Eudoxe de Cnide).
2. Dans son livre *La mesure du cercle*, il obtient une valeur approximative de π en considérant une succession de polygones inscrits et circonscrits au cercle (jusqu’à 96 côtés). Il obtient $3\frac{10}{71} < \pi < 3\frac{1}{7}$ ou $3,1408 < \pi < 3,1429$.
3. Dans *L’Arénaire*, il décrit la manière d’exprimer des nombres très grands, par exemple, $10^{8 \cdot 10^8}$, qu’il compare au nombre de grains de sable contenus dans la sphère des étoiles fixes (en fait, ce nombre est plus grand que le nombre de protons que l’Univers pourrait contenir s’ils étaient tassés les uns sur les autres !).¹⁶
4. Dans *Les corps flottants*, il énonce le célèbre principe d’Archimède, qui stipule que tout corps immergé dans l’eau subit une force vers le haut égale au poids de l’eau déplacée (c.-à-d. l’eau qui serait contenue dans le volume immergé). L’histoire de cette découverte est fameuse. Le tyran de Syracuse Hiéron avait acquis une couronne d’or et désirait savoir si elle était faite d’or pur ou si son orfèvre l’avait roulé en substituant une partie d’argent. Il demanda à Archimède de résoudre ce problème, sans endommager la couronne, bien sûr ! La légende dit qu’Archimède trouva la solution en prenant son bain et sortit aussitôt dans la rue en criant *Eurêka !* (j’ai trouvé !). Il posa la couronne sur une balance à fléaux, en équilibre avec une masse égale d’or pur sur l’autre fléau. Ensuite, il plongea le tout dans l’eau. Si la couronne avait été faite en partie d’argent, son volume aurait été plus grand que celui de l’or reposant sur l’autre plateau, la poussée hydrostatique aurait été supérieure sur le plateau supportant la couronne et celui-ci aurait été en déséquilibre. Il n’en fut rien, ce qui sauva la réputation (et la vie) de l’orfèvre.

Au-delà de cette histoire, les principes de l’hydrostatique sont utilisés par Archimède pour étudier la stabilité des navires et leur ligne de flottaison. Comme modèle, il étudie la flottaison d’un paraboloïde de révolution et calcule qu’une forme suffisamment évasée est toujours stable, alors qu’une forme plus longue n’est stable que pour une densité suffisamment grande.

Archimède est non seulement l’un des plus grands mathématiciens de son temps, il est aussi un mécanicien hors pair. Il est réputé inventeur de la vis sans fin dite *vis d’Archimède*, ainsi que de la mouffle, poulie qui multiplie les forces de l’utilisateur, et avec laquelle un seul homme est en mesure de tirer à terre un navire de grande taille. Il a aussi construit des machines de guerre, notamment lors du siège de Syracuse par les

¹⁶Notons que le système de numération des Grecs utilisait le principe de juxtaposition, comme celui des Égyptiens et des Romains. Les calculs pratiques étaient donc difficiles, ce qui explique en partie l’importance accordée à la géométrie. Plus tard, un système savant sera mis au point, chaque nombre de 1 à 9 étant associé à une lettre, chaque dizaine de 10 à 90 associée à d’autres lettres, etc. (système semi-positionnel). Voir [37], tome 1, pp 441-451.

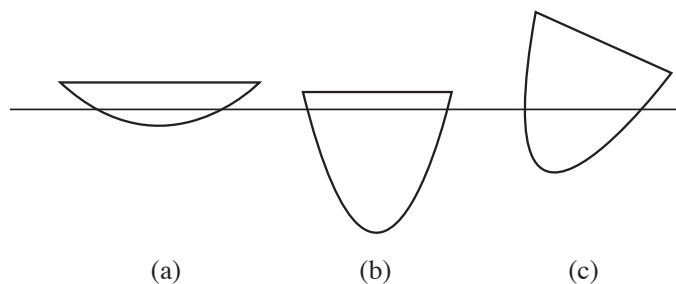


FIG. 2.9 : Archimède démontre qu'un paraboloïde de révolution suffisamment évasé (a) est stable en flottaison, alors qu'un paraboloïde plus long est stable s'il est suffisamment dense (b) et instable dans le cas contraire (c).

romains en –212, lors de la deuxième guerre punique. Il a inventé un système de “miroirs ardents” destiné à enflammer les navires romains.¹⁷ ; il s'agit vraisemblablement d'un très grand nombre de miroirs plats organisés de manière à faire converger les rayons du Soleil sur un point précis. Il périt de la main d'un soldat romain, lors de la prise de la ville.

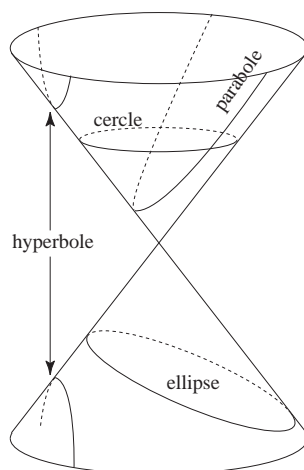


FIG. 2.10 : Définition des sections coniques comme intersections de différents plans avec un cône. Si le plan est perpendiculaire à l'axe du cône, on obtient un cercle. S'il est incliné, mais à un angle inférieur à celui de cône, on obtient une ellipse. S'il est incliné à un angle égal à celui du cône, on obtient une parabole. Enfin, s'il est incliné à un angle supérieur, on obtient une hyperbole.

Appolonius de Perga Appolonius de Perga vécut à Alexandrie, à Éphèse et à Pergame, vers la fin du –III^e siècle et le début du –II^e siècle. Il est l'auteur d'un ouvrage en 8 livres : *Les coniques*, dont sept nous sont parvenus, qui contiennent pas moins de 487 théorèmes. Rappelons (fig. 2.10) que les coniques sont définies par les intersections de différents plans avec un cône (un mathématicien de la période classique, Ménechme, a le premier introduit cette définition des coniques). Appolonius étudie en grand détail les propriétés de ces courbes (ellipse, parabole, hyperbole). Son oeuvre sera plus tard essentielle aux travaux de Kepler sur les orbites et de Galilée sur les projectiles. Elle permet aux Grecs de résoudre des problèmes algébriques du second degré. Même si Appolonius n'est pas l'inventeur des coniques, il demeure la référence la plus complète sur ce sujet et son ouvrage sera étudié avec soin par les mathématiciens jusqu'à l'époque moderne. Avec Eudoxe, Euclide et Archimède, Appolonius est considéré comme l'un des plus grands mathématiciens de l'Antiquité.

¹⁷Voir [[82]]

Héron d'Alexandrie Héron vécut au I^{er} siècle de notre ère. Il est surtout célèbre pour ses machines, en particulier un lointain précurseur de la machine à vapeur, constitué d'un globe tournant par la réaction de la vapeur sortant de deux orifices (réacteurs) qui lui sont attachés. Héron est avant tout un *mécanicien*, mais aussi l'auteur d'un traité intitulé *Le dioptré*, dans lequel il décrit un instrument de mesure longtemps utilisé en arpentage et en astronomie. Il décrit plusieurs machines pratiques (presseoirs, vis sans fin, leviers, etc.). Il est aussi l'auteur des *Métriques*, traité de géométrie à tendance pratique, dans lequel il donne une prescription pour le calcul de l'aire d'un triangle en fonction de ses côtés a , b , c et du demi-périmètre $p = (a + b + c)/2$, équivalente à la formule suivante, dite "de Héron" :

$$A = \sqrt{p(p-a)(p-b)(p-c)} \quad (2.1)$$

Ce qui est nouveau dans cette pratique est le calcul de la quatrième puissance d'une longueur, chose inconcevable pour les géomètres plus anciens, pour lesquels toute quantité devait avoir un sens strictement géométrique. Héron distinguait les grandeurs géométriques des nombres associés à ces grandeurs.

2.5.2 Astronomes

Nous ne disposons d'aucun traité d'astronomie datant de la période hellénistique proprement dite. Ce que nous savons de cette période doit être inféré indirectement, à travers des textes écrits plus tard. Le plus important de ces textes est l'*Almageste* de Claude Ptolémée, écrit au 2^e siècle de notre ère. L'*Almageste*, ainsi que d'autres textes moins volumineux, nous aident à reconstituer en partie l'astronomie de l'époque.

Aristarque de Samos Aristarque de Samos (–310/–230), élève de Straton, fut le premier à proposer clairement un système du monde *héliocentrique* : le Soleil est au centre du monde et tous les astres tournent autour de lui. La Terre est un astre comme les autres et tourne sur elle-même en une journée, ce qui explique le mouvement quotidien des autres astres. Nous ne connaissons malheureusement que peu de choses sur les idées d'Aristarque, car aucune de ses oeuvres ne nous est parvenue, sauf une brève explication de la méthode utilisée pour estimer la distance Terre-Lune et Terre-Soleil. Ce n'est qu'indirectement, entre autres par un passage très bref d'Archimède, qu'on connaît son oeuvre. En particulier, nous ignorons si Aristarque avait proposé un principe – comme la gravitation universelle – expliquant la position centrale du Soleil.

Il est possible que ce système ait réellement été proposé par *Héraclide du Pont* (–388/–312), mais probable que le système d'Héraclide ne donnait comme satellites du Soleil que Mercure et Vénus. En tout cas, Héraclide fut le premier à professer la *rotation* de la Terre sur elle-même.

Il est intéressant de noter que la notion de sphère des étoiles fixes, défendue notamment par Aristote, n'est nécessaire que dans un système où la Terre est considérée fixe, c'est-à-dire sans rotation diurne. Comment expliquer sinon que toutes les étoiles tournent au même rythme autour de la Terre ? Par contre, dès lors qu'on accepte la rotation diurne de la Terre, cette notion de sphère des fixes n'est plus nécessaire. Ainsi, on a tout lieu de croire qu'Héraclide, Aristarque et les autres héliocentristes de l'Antiquité ne considéraient pas la sphère des fixes autrement que comme un outil de calcul et qu'ils ne lui accordaient aucune existence physique. Un traité de l'astronome Geminus (1^{er} siècle avant notre ère) parle de la "soi-disant" sphère des étoiles fixes, insiste qu'il ne s'agit que d'un objet conventionnel, utile dans le positionnement des astres, et qu'elle n'existe pas en réalité, car les étoiles, selon lui, ne sont pas toutes à égale distance de la Terre.

On a tout lieu de croire que le système héliocentrique d'Aristarque fut accepté par plusieurs astronomes de l'époque. On pourrait parler d'une *école héliocentrique*. Pourquoi ce système, redécouvert par Copernic 18 siècles plus tard, fut-il abandonné ? Aucune réponse claire n'existe. On peut citer les raisons possibles suivantes :

1. L'absence de parallaxe visible des étoiles fixes. On supposait alors que les étoiles fixes étaient relativement proches de la Terre et on ne comprenait pas que les constellations n'apparaissent pas déformées lorsque la Terre se déplace autour du Soleil. Aristarque avait du supposer que les étoiles fixes étaient extrêmement éloignées.
2. L'élément "terre", le plus lourd, devait être au centre de l'Univers. Ce principe tenait lieu de gravitation universelle aux Anciens.

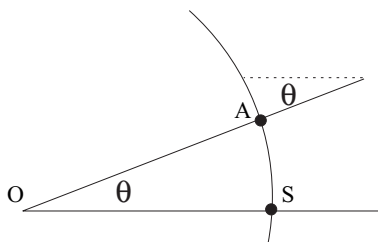


FIG. 2.11: Diagramme illustrant la méthode d'Ératosthène pour calculer la circonférence de la Terre.

Ératosthène Ératosthène de Cyrène (–275/–175) est célèbre pour avoir donné la première estimation précise du diamètre de la Terre. Nous ne disposons pas de l'oeuvre d'Ératosthène lui-même, mais ses travaux nous sont connus par l'intermédiaire de Cléomède, qui écrivait au premier siècle avant notre ère. Cléomède explique la méthode d'Ératosthène comme suit (voir figure 2.11) :

Il était connu qu'aux environs de Syène¹⁸ (S), le jour du solstice d'été, le Soleil éclaire un puits jusqu'au fond à midi. C'est donc en ce point que se trouve le tropique du Cancer, et le point S est situé sur la droite qui va du centre de la Terre (O) au Soleil à ce moment-là. Le même jour, Ératosthène mesura l'angle θ que fait l'ombre d'un objet vertical à midi, à Alexandrie (A) et obtint $\pi/25$ radians ($7,2^\circ$). Connaissant la longueur de l'arc de cercle AS (5000 stades, sur le même méridien), il en déduisit que la circonférence C est $50 \times 5\,000 = 250\,000$ stades.

L'explication de Cléomède n'est qu'une vulgarisation de la méthode, plus complexe, utilisée par Ératosthène. Le diamètre terrestre attribué à Ératosthène par les auteurs anciens est en fait 252 000 stades. Comment comparer cette valeur à ce que l'on sait aujourd'hui ? Pline l'ancien (1er siècle de notre ère) donne une équivalence entre le stade utilisé par Ératosthène (différent du stade standard) et une mesure romaine de l'époque dont on connaît la valeur, ce qui nous permet d'affirmer que le stade d'Ératosthène valait entre 155 m et 160 m. La circonférence de la Terre, selon Ératosthène, est donc située entre 39 060 km et 40 320 km, alors que la valeur moderne est de 40 000 km (d'après la définition originale du mètre). Ératosthène a donc estimé le diamètre terrestre avec une erreur d'au plus 2.4% ! Remarquons que cette erreur est avant tout due à notre ignorance de la valeur précise du stade ! L'erreur intrinsèque d'Ératosthène était peut-être inférieure à cela.

L'explication donnée par Cléomède est critiquable, car (i) la distance entre Syène et Alexandrie est supérieure à 5 000 stades, (ii) Alexandrie et Syène ne sont pas vraiment sur le même méridien et (iii) Syène n'est pas exactement située sur le tropique. Étant donné ces erreurs, il est douteux qu'Ératosthène soit arrivé à une valeur si précise de la circonférence terrestre. Mais il ne faut pas prendre le texte de Cléomède au pied de la lettre ici, car il ne fait qu'illustrer un principe, et très brièvement, alors qu'on sait qu'Ératosthène avait écrit tout un livre sur la question. Il est plausible que les calculs d'Ératosthène tenaient compte de tous ces facteurs. L'Égypte ptolémaïque, comme celle des pharaons, tenait un cadastre très serré et des arpenteurs au service du roi consignaient les distances de village en village. Ératosthène et son équipe (car un tel projet n'est pas entrepris par un seul homme) devaient avoir ces données à leur disposition. Au fond, le fait que Syène ne soit pas sur le même méridien qu'Alexandrie n'est pas important, car en pratique les mesures ne sont pas faites en même temps à Alexandrie et sur le tropique ! L'important est de pouvoir localiser le tropique avec une précision suffisante, ce qu'Ératosthène pouvait faire avec une marge d'erreur de 300 stades, toujours selon Cléomède.

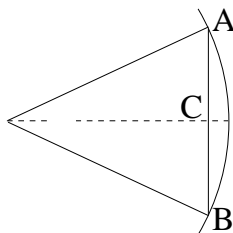
Ératosthène est aussi connu pour sa méthode du "crible" pour trouver les nombres premiers : il s'agit d'éliminer de la liste des nombres entiers tous les multiples des entiers, en succession.

Hipparque Hipparque (–161/ – 127) fut le plus grand astronome de l'Antiquité. Malheureusement, pratiquement rien de son oeuvre ne nous est parvenu et on doit reconstruire ses idées à partir de commentaires figurants dans d'autres oeuvres, en particulier celle de Claude Ptolémée, écrite trois siècles plus tard.

¹⁸Aujourd'hui appelée Assouan.

Hipparque fut à la fois un observateur méticuleux et un mathématicien de génie. Il effectua des observations astronomiques précises et méthodiques, à l'aide d'instruments perfectionnés pour l'époque. Signalons quelques-unes de ses contributions.

- Hipparque construisit un catalogue d'au moins 800 étoiles, en notant leurs positions avec précision et en évaluant leurs magnitudes apparentes. Il aurait réalisé ce catalogue dans le but de léguer à la postérité un outil permettant de détecter l'apparition de nouvelles étoiles (novas) ou même de pouvoir observer, à long terme, le mouvement des étoiles les unes par rapport aux autres. Hipparque, en avance sur son temps, semble avoir délaissé la notion de sphère des étoiles fixes pour lui préférer un espace infini dans lequel les étoiles peuvent se déplacer librement. Or, l'astronome anglais Halley, en examinant en 1718 le catalogue d'Hipparque (transmis par Ptolémée) y décela des différences d'avec ses observations sur Sirius, Arcturus et Aldébaran, qui confirmèrent le mouvement propre de ces étoiles. Sirius s'était déplacé de $30'$, et Aldébaran de 1 degré. Hipparque réussit donc son pari, après presque 2000 ans.
- Hipparque, dans le but de répertorier les positions des étoiles, inventa la *trigonométrie*, en particulier la trigonométrie sphérique, c'est-à-dire l'étude des triangles découpés sur la surface d'une sphère. Il élaborà à cet effet une table de cordes (les quantités plus familières aujourd'hui, sinus et cosinus, furent introduites plusieurs siècles après par les astronomes indiens). Notons que la corde d'un angle θ , illustrée ci-contre, est la longueur AB, alors que le sinus de la moitié de cet angle est AC, si le rayon du cercle est l'unité. La corde d'un angle θ est donc égale à $2 \sin(\theta/2)$.



(2.2)

- Hipparque fut le premier à reconnaître la *précession des équinoxes*, c'est-à-dire le déplacement lent du point vernal (équinoxe de printemps) sur le zodiaque. Il obtint la valeur de $46''$ par année pour cette précession (la valeur moderne est $50''$, 26). En raison de cette précession, la position du Soleil dans le zodiaque à l'équinoxe de printemps fait un tour complet en 26 000 ans. Dans le temps des Sumériens, l'équinoxe se produisait dans la constellation du Taureau (ère du Taureau). Ensuite, l'équinoxe glissa dans la constellation voisine du Bélier (c'est à cette époque que l'astrologie figea ses pratiques). Depuis 2 000 ans, l'équinoxe se produit dans la constellation des Poissons et elle glisse progressivement dans la constellation du Verseau (nous entrerons dans l'ère du Verseau dans six siècles environ). Hipparque déduisit la précession des équinoxes en comparant ses observations précises avec celles effectuées 150 ans auparavant par l'astronome Timocharis d'Alexandrie.
- À partir de la périodicité des éclipses connues des Babyloniens, Hipparque estime la durée du mois à 29 jours, 12 heures, 44 minutes et $3\frac{1}{3}$ secondes, soit moins d'une demi-seconde de plus que la valeur présentement admise !
- Hipparque estime la durée de l'année à 365 jours, 5 heures, 55 minutes et 12 secondes, soit 6,5 minutes de trop par rapport à la valeur actuelle.
- Hipparque, en observant les éclipses de Lune, estime la distance Terre-Lune à 59 rayons terrestres, alors que la valeur moyenne actuelle est de 60,25. Il estime par ailleurs le rayon de la Lune à $1/3$ du rayon terrestre, alors que la valeur réelle est de 0,27 rayon terrestre.

Hipparque fut-il le Newton de l'Antiquité ? La question est téméraire, mais de récentes analyses de textes en ont démontré la pertinence. Selon L. Russo [[67], [66]], les progrès de la physique furent tels pendant la période hellénistique que des astronomes du II^e siècle, principalement SÉLEUCOS de Babylonie et Hipparque, possédaient une théorie *dynamique* du mouvement des planètes, c'est-à-dire une théorie basée sur le principe d'inertie et la notion de force, qu'ils auraient appelée *phora* ($\vartheta\omicron\rho\alpha$). Cette hypothèse audacieuse est basée sur l'analyse de textes de Plutarque, Sénèque, Vitruve et Pline, écrits quelques générations après Hipparque (les textes astronomiques de cette époque sont tous perdus). Dans ces textes on trouve des références claires au principe d'inertie – qui stipule qu'un objet se déplace en ligne droite à vitesse

constante à moins qu'une force s'exerce sur lui – et au fait que la Lune tourne autour de la Terre en raison d'une force que cette dernière exerce sur elle et qui contrebalance son mouvement naturel à s'éloigner en ligne droite, etc. Si cette hypothèse était correcte, elle ferait d'Hipparque l'égal de Newton, mais un Newton rapidement oublié. Mentionnons que Séleucos, contemporain d'Hipparque, est connu pour sa défense des idées héliocentriques et par sa discussion des marées et de leurs variations annuelles, qu'il attribuait à une influence de la Lune et du Soleil.

On peut se demander comment un tel progrès scientifique, s'il a bien eu lieu, a pu être perdu si facilement. En fait, c'est toute la question de la survivance des connaissances hellénistiques qui se pose ici. Notons par exemple que certaines oeuvres d'Archimède ne nous sont parvenues que par une seule copie manuscrite et que d'autres de ses oeuvres sont définitivement perdues. Le coût prohibitif des livres à cette époque (en particulier du papyrus) est certainement un facteur. Plus importante, probablement, est la difficulté mathématique des théories d'Hipparque, qui a restreint considérablement son public et, par conséquent, ses copistes. Généralement, les oeuvres les plus profondes et les plus avancées ne sont pas les plus faciles d'accès et sont donc les plus susceptibles de disparaître en cas de détérioration de la vie scientifique, comme celle qui se produisit au milieu du II^e siècle avant J.-C. La révolution scientifique oubliée de la période hellénistique peut servir de leçon à la société moderne, qui présente certains symptômes avant-coureurs d'un déclin des connaissances scientifiques.

Ptolémée Claude Ptolémée (ne pas confondre avec les Ptolémées, rois lagides) vécut au II^e siècle de notre ère, à Alexandrie. Il appartient donc à la période romaine et non hellénistique proprement dite. On sait qu'il procéda à des observations astronomiques entre 127 à 141. Son ouvrage principal, l'un des traités scientifiques les plus remarquables que nous ait laissés l'Antiquité, est intitulé *Composition mathématique* (Μαθηματικὴ συντάξις) et a été rédigé vers l'an 150. Dans ce livre, Ptolémée expose la théorie mathématique de l'astronomie, dont la principale partie consiste en un système destiné à décrire et prévoir la position des astres (lune, soleil et planètes). Ce livre important fut plus tard appelé "Le grand livre", par opposition à un autre livre plus modeste du même auteur, sorte de résumé du premier. Plus tard, les Arabes déformèrent le grec *megistôn* (grand) et appelèrent ce livre "al-majisti", nom qui fut à son tour corrompu par les Occidentaux du moyen-âge pour devenir *Almagesti* en latin et *Almageste* en français ; c'est donc ainsi que ce livre, l'un des plus importants de l'histoire de l'astronomie, est couramment appelé. Ptolémée y fait souvent référence à Hipparque et il est difficile de distinguer la contribution originale de Ptolémée de ce qu'il tient de ses prédécesseurs.

La théorie de Ptolémée sur le mouvement des astres repose sur les notions géométriques de cercles épicycles et excentriques. Essayons tout d'abord de comprendre comment le mouvement des planètes peut être sommairement décrit par ces notions. Considérons la Fig. 2.12. En Ia, on illustre l'orbite circulaire de la Terre T et d'une planète intérieure P (Mercure ou Vénus) autour du soleil, dans un schéma héliocentrique simplifié. La vision du même système dans le schéma géocentrique de Ptolémée est illustré en Ib. La Terre est maintenant fixe, le soleil effectue une révolution d'un an autour de la Terre et la planète P une révolution autour du point S. Le mouvement de la planète, vu de la Terre, requiert donc la construction de deux cercles : le *déférent* et l'*épicycle*. Le rayon de l'épicycle est plus petit que celui du déférent et son centre parcourt le déférent. En IIa, on illustre plutôt l'orbite d'une planète extérieure P (Mars, Jupiter ou Saturne) avec celle de la Terre autour du soleil. Les trois points S, T, et P définissent en tout temps un parallélogramme dont le point immatériel C constitue le quatrième sommet. Les distances SP et ST sont constantes dans le temps, mais l'angle $\angle TSP$ varie. Dans le schéma géocentrique illustré en IIb, le point T est immobile et le point C décrit une orbite circulaire autour du point T, dans un temps égal à la période de l'orbite que suivrait la planète P dans un schéma héliocentrique (la distance TC est identique en tout temps à SP et donc constante). La planète P, elle, parcourt l'épicycle en une période d'un an. On voit qu'il est possible de représenter le mouvement de toutes les planètes, intérieures comme extérieures, par des épicycles. Le recours à un épicycle peut facilement expliquer le mouvement rétrograde apparent des planètes sur une certaine partie de leur orbite, tel qu'illustré à la Fig. 2.13.

Le schéma de Ptolémée comporte des coïncidences qui ne peuvent être expliquées naturellement que dans un système héliocentrique. Il est clair d'après la figure 2.12 que, pour une planète intérieure, le centre de l'épicycle est toujours situé sur la droite qui joint la Terre et le Soleil. D'autre part, pour une planète exté-

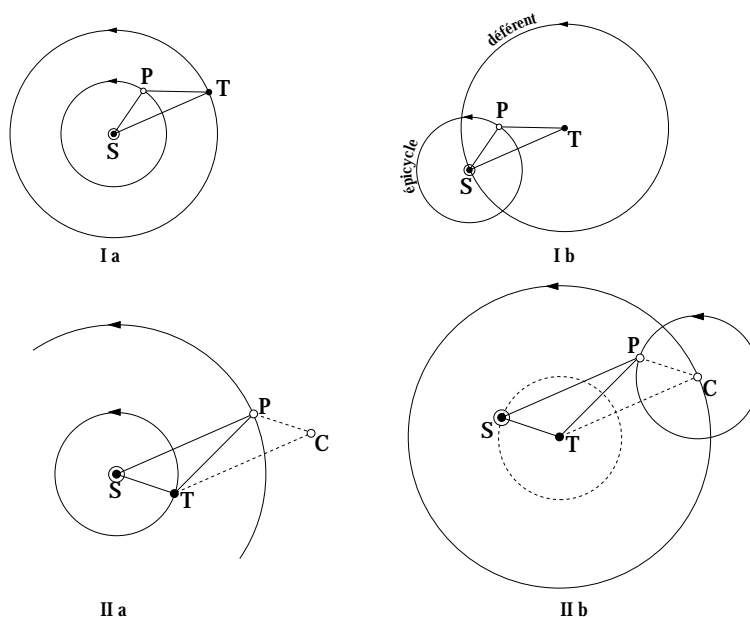


FIG. 2.12 : Illustration du principe de l'épicycle dans la représentation sommaire du mouvement d'une planète dans un système géocentrique. Voir le texte pour une explication.

rière, la position de la planète sur son épicycle (segment PC sur la partie IIb de la figure) est aussi parallèle à cette droite. Si le point de vue géocentrique était fondamentalement correct, ces coïncidences n'auraient pas de raison d'être. Elles constituent en fait des arguments solides en faveur d'un système héliocentrique.

En réalité, les orbites planétaires sont plus complexes, car elles ne forment pas des cercles parfaits, mais des ellipses, dont le soleil est à l'un des foyers. Une planète parcourt son orbite à une vitesse non uniforme, plus grande lorsqu'elle est plus rapprochée du soleil et plus petite lorsqu'elle est plus éloignée. Ces complications font qu'un schéma géocentrique requiert un épicycle même pour décrire l'orbite apparente du soleil autour de la Terre. D'autre part, Ptolémée a recouru à un dispositif ingénieux, par lequel le centre de l'épicycle ne parcourt pas le déferent à vitesse uniforme. Le mouvement de l'épicycle est plutôt uniforme par rapport à un autre point appelé *équiant* (cf Fig 2.13), de sorte que les quatre secteurs illustrés sur la figure 2.13 sont parcourus en des temps égaux. La Terre n'est dans ce cas plus placée au centre du déferent, mais est excentrique par rapport à lui, disposée symétriquement par rapport à l'équiant. De cette manière, la course non uniforme des planètes autour de la Terre est décrite de manière satisfaisante pour l'époque. Ce sont les observations de Tycho Brahé (1546/1601) qui ont les premières indiquées qu'un système à base de cercles comme celui-ci était insuffisant. Le principal défaut du système de Ptolémée n'est pourtant pas son inexactitude, mais son caractère artificiel et compliqué. On dit que le roi de Castille Alphonse X le Sage, lorsqu'on lui expliqua le système de Ptolémée, s'exclama : "Si Dieu m'avait consulté avant de créer tout cela, je lui aurais conseillé quelque chose de plus simple...".

Notons que la théorie des excentriques et des épicycles s'oppose à celle des sphères homocentriques d'Eudoxe. L'une des raisons physiques invoquées contre le système d'Eudoxe et pour le système de Ptolémée est l'éclat variable des planètes, notamment Mars et Vénus. Dans le système d'Eudoxe, chaque planète reste en tout temps à la même distance de la Terre et cette différence d'éclat est inexplicable sauf en invoquant une variation intrinsèque de l'éclat, ce qui contredit la permanence du monde céleste. Au contraire, dans le système de Ptolémée, la distance des planètes à la Terre n'est pas constante, ce qui peut expliquer les variations d'éclat.

Notons aussi que si la théorie des excentriques et des épicycles peut raisonnablement bien représenter les *longitudes* des planètes (c'est-à-dire leur position le long du zodiaque), il en va autrement pour leur

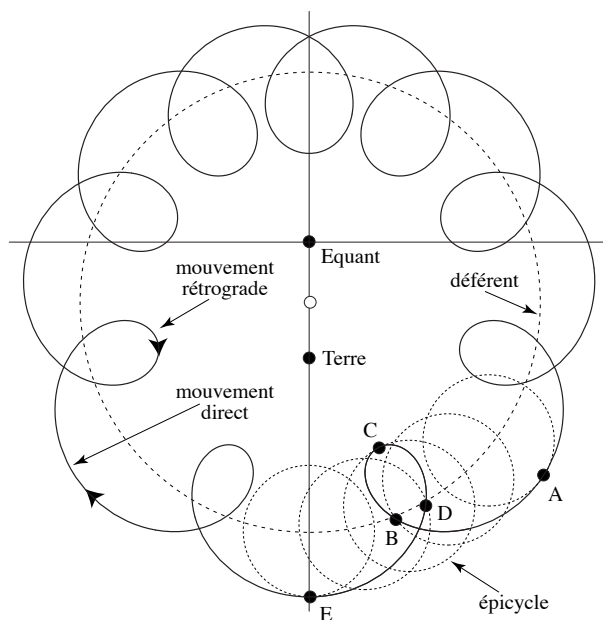


FIG. 2.13 : Schéma démontrant comment l'utilisation d'épicycles peut représenter le mouvement rétrograde d'une planète par rapport à la Terre. Les points A à E représentent des points équidistants sur l'épicycle (séparés par des intervalles de temps égaux, en l'absence d'équant) mais non équidistants sur l'orbite observée. On indique aussi l'équant, point par rapport auquel le déplacement du centre de l'épicycle est uniforme. La Terre n'est pas au centre du déférent, mais lui est excentrique.

latitude, c'est-à-dire leur déviation (faible) par rapport à l'écliptique. Le problème des latitudes est la pierre d'achoppement de l'astronomie ptolémaïque et même de l'astronomie copernicienne. Ce n'est que Kepler qui résoudra le problème, en supposant le premier que les plans des orbites des planètes passent par le Soleil et non par la Terre.

Des travaux récents [59] tendent à démontrer que Ptolémée n'est pas l'auteur du concept d'équant, mais que les héliocentristes de l'école d'Aristarque, ou peut-être Hipparque, en seraient les auteurs. On sait par ailleurs qu'il n'est pas l'inventeur des épicycles et des excentriques, car Apollonius de Perga les utilisaient avant lui. De plus, une analyse détaillée des données de Ptolémée sur les positions des planètes peut nous faire croire qu'il en a fabriqué quelques unes pour préserver l'accord avec son système théorique. En fait, Ptolémée aurait emprunté des observations et des données planétaires aux anciennes théories héliocentriques pour rédiger sa propre théorie géocentrique, ce qui constituerait un recul du point de vue scientifique. N'oublions pas que Ptolémée n'était pas seulement astronome, mais aussi astrologue et que le dogme astrologique a toujours placé la Terre en position centrale. En somme, malgré l'immense influence de son oeuvre jusqu'à Copernic, Ptolémée nous apparaît plutôt comme une figure de la science gréco-romaine en déclin du début de l'ère chrétienne.

Ptolémée est aussi l'auteur d'une *Géographie*, à partir de laquelle plusieurs cartes géographiques ont été tracées jusqu'à la Renaissance. Cependant, il s'agit d'une géographie mathématique et non descriptive. D'un point de vue mathématique, le problème de la cartographie revient à établir une correspondance entre la surface d'une sphère (la Terre) et une surface plane (la carte géographique). Ptolémée utilisa à cette fin la projection stéréographique (fig. 2.14a), dans laquelle un point P sur la Terre est associé à un point Q sur le plan équatorial par une prolongation du segment OP originaire du pôle. Cette projection a en fait été introduite par Hipparque, quoique ce dernier utilisait non pas le plan équatorial, mais le plan tangent au pôle sud. Ptolémée a par ailleurs inventé une projection conique (fig. 2.14b), dans laquelle le segment OP, originaire du centre de la Terre, est prolongé jusqu'à un cône tangent à la surface de la Terre. Le cône peut ensuite être "déroulé" sur un plan et former une carte.

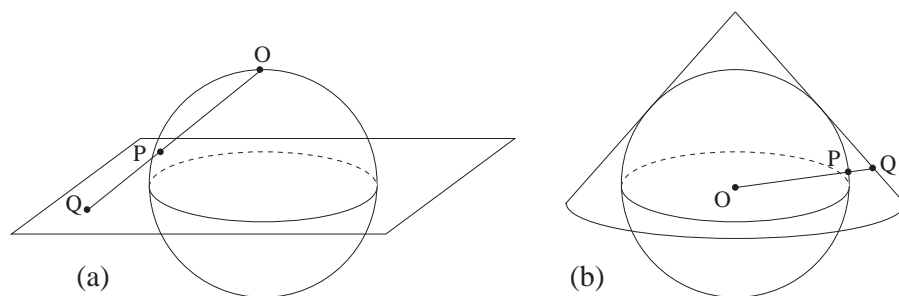


FIG. 2.14: Projections stéréographique (a) et conique (b) utilisées par Ptolémée dans sa Géographie.

Enfin, signalons que Ptolémée est l'auteur d'un traité d'astrologie en quatre livres, pour cette raison surnommé le *Tetrabiblos*. Le double visage (scientifique et occultiste) de Ptolémée nous apparaît suspect aujourd'hui, mais ne l'était probablement pas du tout à son époque.

2.5.3 Médecins

Dans le domaine médical également notre connaissance de la science hellénistique est indirecte. Aucun traité ne nous est parvenu directement et c'est par des allusions d'autres auteurs que nous connaissons partiellement les travaux de ses deux plus éminent représentants, Hérophile d'Alexandrie et Érasistrate de Céos.

Hérophile Originaire de Chalcédoine, HÉROPHILE fut invité à Alexandrie par Ptolémée I et y continua ses travaux sous Ptolémée II. Il étudia à Cos et professa la théorie des humeurs, mais il reste surtout célèbre pour ses contributions à l'*anatomie*. Ce progrès furent facilités du fait que les dissections d'humains, impossibles en Grèce, étaient tolérées à Alexandrie : les Égyptiens avaient de toute façon l'habitude d'embaumer leurs morts soigneusement. Citons ses contributions principales :

1. L'étude du système nerveux. Il distingua les nerfs des ligaments et des vaisseaux sanguins. Il plaça le siège de l'âme et des sensations dans le cerveau, contrairement à Aristote qui le plaçait dans le cœur.
2. Il distingua les veines des artères. Il croyait cependant que la pulsation des artères était intrinsèque et non causée par les contractions du cœur.
3. Il consacra un livre entier à l'oeil. Il y décrivait la rétine (qu'il appelle l'arachnoïde, par analogie avec une toile d'araignée), la cornée et l'iris.
4. Il est le premier médecin connu à avoir pris le pouls de ses patients, aidé d'une clepsydre (horloge à eau).
5. Il est aussi le découvreur des trompes de Fallope, en avance de 1800 ans sur Fallope lui-même.

Enfin, comme il était courant dans le monde grec, il considérait que la diététique et l'exercice physique (gymnastique) sont des facteurs importants dans le maintien de la santé.

Érasistrate Successeur d'Hérophile, ÉRASISTRATE (–304/ – 258) résida probablement à Antioche. Il fut le premier médecin connu à pratiquer des autopsies dans le but de connaître la cause de la mort. Il pratiqua des expériences sur la déperdition énergétique, préfigurant ainsi l'étude du métabolisme. Il distingua les nerfs sensitifs des nerfs moteurs. Il affirma que toutes les parties du corps sont tissées de veines, d'artères et de nerfs. Érasistrate enseigne que le cœur agit comme une pompe, mais qu'un côté du cœur attire le sang produit par le foie (via la veine cave) alors que l'autre côté attire le *pneuma* absorbé par les poumons et ainsi transporté par les artères ! On pense que cette erreur est due à la pratique d'étrangler les animaux avant de procéder à la dissection (on n'effectuait pas de vivisections), ce qui avait pour effet de relâcher la tension artérielle et de vider les artères, donnant ainsi la fausse impression qu'elle ne portaient pas de sang. Érasistrate observe les valvules, qui forcent l'écoulement du sang à se produire toujours dans le même sens.

Galien De tous les médecins grecs, le plus influent dans les siècles qui suivront est sans conteste Claude GALIEN¹⁹ (129/ ~ 200). La raison en est qu'il nous a laissé un grand nombre d'oeuvres écrites et qu'il était, de plus, très soucieux de souligner sa contribution personnelle. Galien est né à Pergame et a étudié la médecine notamment dans sa ville natale et à Alexandrie. Il fut pendant quelques années médecin de l'école de gladiateurs de Pergame, ce qui lui permit d'acquérir une certaine expérience en chirurgie. Cependant, il semble qu'il préférât de beaucoup la médecine à la chirurgie. Sa réputation le mena jusqu'à Rome où il devint médecin de la famille impériale sous Marc-Aurèle.

Galien fut fortement influencé dans sa pratique par l'école hippocratique et dans ses conceptions physiologiques par Aristote. En fait, on peut faire un parallèle entre Galien et l'astronome Claude Ptolémée. Les deux sont des figures relativement tardives de l'Antiquité, ce qui a aidé à la conservation de leurs oeuvres et à leur renommée. Les deux ne sont pas aussi originaux qu'on l'a longtemps cru, se basant surtout sur les résultats de leurs prédécesseurs.

Il semble que Galien ait procédé à de nombreuses dissections, mais sur des animaux seulement. Vésale, un anatomiste célèbre de la Renaissance, s'est aperçu que certaines descriptions anatomiques données par Galien décrivaient non pas l'être humain, mais le macaque !

Les conceptions de Galien sur le système vasculaire sont particulières et méritent d'être mentionnées. Comme Aristote, Galien pense que c'est le sang qui nourrit et conserve le corps. Cependant, le rôle du coeur est plutôt curieux : entre le foie et le ventricule droit se produit un mouvement de va-et-vient du sang, chargé d'*esprits naturels* provenant de la digestion. Le ventricule gauche, lui, reçoit des poumons le *pneuma*, qui devient un esprit vital, distribué par les artères de par le corps, après avoir reçu une partie du sang, passé du ventricule droit au ventricule gauche par le septum inter-ventriculaire, à travers des pores invisibles (!). Le cerveau reçoit une partie de cet esprit vital, qui y devient *esprit animal*, redistribué à travers le corps par l'intermédiaire des nerfs, supposés creux pour le besoin de la cause. Signalons que, selon Galien, la respiration remplit aussi un rôle de refroidissement du sang.

La médecine de Galien est devenue un véritable dogme au moyen-âge. Le cours de médecine à la Faculté se résumait à une lecture à haute voix d'un livre de Galien par le maître, tandis qu'un assistant désignait en même temps les lieux anatomiques sur un cadavre disséqué. C'est l'anatomiste flamand Vésale qui, au milieu du XVI^e siècle, fut le premier à remettre en question le système galénique.

2.6 Le déclin de la science antique

Entre l'âge d'or de la science hellénistique (les III^e et II^e siècles avant notre ère) et le début du moyen-âge (Ve siècle), la science amorce ce qui semble être un long mais inexorable déclin. Même les plus grands savants de cette période, comme Ptolémée et Galien, ne font peut-être que reprendre à leur compte des connaissances passées. En tout cas, leurs contributions originales ne peuvent être comparées à celles de leurs prédécesseurs de trois siècles. La majorité des savants se contente de commenter les oeuvres d'Aristote, d'Euclide ou d'Appolonius. Le déclin des sciences antiques se produit indéniablement dès le début de l'empire romain et non après sa chute, comme on pourrait naïvement le croire.

Les Romains, excellents ingénieurs, ont laissé des routes et des égoûts encore utilisables après 2000 ans, mais leur répugnance face à la philosophie spéculative n'a pas permis un réel développement des sciences chez eux. En particulier, on ne connaît pas un seul mathématicien romain ! Parmi les auteurs latins touchant à la science, citons

1. LUCRÈCE (Titus Lucretius Carus, ~ -98/ ~ -55) est un poète rattaché à l'école épicurienne. Dans un long poème intitulé *De Natura Rerum* (De la Nature), il décrit la physique épicurienne (i.e. atomiste) et en tire des leçons morales. Il met en garde les humains contre une crainte inutile des dieux, car le destin du monde est régi par des phénomènes matériels seulement.
2. VITRUVÉ (Marcus Vitruvius Pollio) est un ingénieur-architecte du I^{er} siècle avant notre ère. Dans

¹⁹ Galênos en grec, Galenus en latin, Galen en anglais.

son oeuvre, *De Architectura* (De l'Architecture), il explique non seulement les principes théoriques et esthétiques de l'architecture, mais aussi les bases de la physique et la mécanique connues à l'époque.

3. PLINÉ l'Ancien (Caius Plinius Secundus, 23/79) est avant tout un naturaliste, auteur d'une vaste encyclopédie (la première connue) intitulée *Histoire naturelle* dans laquelle il veut rassembler l'ensemble des connaissances de son temps. Plin fait souvent preuve de crédulité excessive face aux anecdotes curieuses qu'on lui raconte. Il mourut en tentant de secourir les victimes de l'éruption du Vésuve en 79, éruption qui ensevelit la ville de Pompéi.

Ces auteurs latins ne sont pas du tout comparables à leurs prédécesseurs grecs quant à l'originalité ou la profondeur, mais leurs oeuvres ont connu une diffusion plus large au moyen-âge et pendant la Renaissance, du fait qu'elles sont écrites en latin et qu'elles sont aussi beaucoup plus abordables.

Les scientifiques de valeur de cette époque romaine sont encore des Grecs. Nous avons décrit les travaux de Ptolémée et de Galien. Signalons aussi un mathématicien plus tardif encore, DIOPHANTE d'Alexandrie (325/410), l'auteur des *Arithmétiques* et probablement le plus grand algébriste Grec. Il étudia les équations quadratiques à une et plusieurs inconnues, dont les solutions étaient toujours supposées rationnelles. Aujourd'hui, on désigne par *équation diophantine* une équation algébrique sur l'ensemble des entiers.

Causes du déclin de la science antique Pourquoi la science antique a-t-elle suivi cette pente descendante ? C'est à ce genre de question que les historiens tentent de répondre et la réponse donnée est souvent fortement teintée par les opinions politico-religieuses de chaque auteur. On suggère généralement les explications suivantes :

1. Une explication *culturelle* : Les Romains étaient un peuple fondamentalement pratique, qui méprisait les spéculations philosophiques des Grecs. L'aristocratie romaine confiait typiquement l'éducation de ses enfants à des tuteurs grecs, et s'intéressait occasionnellement aux questions de philosophie, mais sans s'y engager comme les Grecs le firent.
2. Une explication *économique* : La science se développe le plus aisément dans un environnement dominé par la bourgeoisie marchande, avide d'innovations techniques, et demande aussi un mécénat de l'État. Ces conditions étaient idéalement réunies à l'époque hellénistique, mais disparurent progressivement sous l'empire romain. En effet, les Romains sont plus un peuple d'agriculteurs que de marchands et les conquêtes romaines se traduisirent par l'apparition d'immenses domaines agricoles appartenant aux nobles et alimentés d'une abondante main-d'oeuvre à bon marché (esclaves). Dans ce contexte, l'innovation technique et non seulement moins nécessaire, mais peut même être un danger à la stabilité de l'ordre social.
3. Une explication *religieuse* : Les conquêtes d'Alexandre ont non seulement contribué à exporter la philosophie grecque vers l'Orient, mais aussi à importer des croyances ou religions orientales vers l'Occident hellénisé. Des cultes aussi divers que ceux de Baal, d'Isis, de Cybèle, de Mithra, etc. ont gagné en popularité, ainsi que des pratiques occultes dont l'alchimie et l'astrologie. Ces pratiques auraient détourné l'effort collectif des Grecs des sciences rationnelles.

Il est certain que tous ces facteurs ont contribué au déclin des sciences, mais il est difficile d'établir le partage des responsabilités. La montée du *christianisme* n'a d'ailleurs pas amélioré le sort de la science antique. Le christianisme est une religion essentiellement *salvatrice*, qui promet aux pauvres et aux esclaves, misérables dans un monde en détresse, une vie meilleure dans l'au-delà. Cet espoir explique en partie la popularité croissante du christianisme dans la cruelle société impériale. En effet, les divisions de classe et les contrastes de richesse étaient devenus très criants sous l'empire romain et l'activité philosophique, apanage des aristocrates, est devenu condamnable aux yeux des premiers chrétiens, dans leur rejet pêle-mêle de tout ce qui était associé à l'aristocratie : luxe, puissance matérielle, divertissements, etc. Plus profondément, on ne considère plus que la connaissance véritable peut être acquise par la raison, la patience et l'objectivité, mais plutôt par la pureté des sentiments et la foi : "je crois parce que c'est absurde", disait Tertullien (160/222), l'un des premiers écrivains chrétiens. La religion chrétienne devient dominante dans l'empire romain à partir du règne de Constantin (306/337). L'édit de Milan (313) reconnaît *de facto* le christianisme comme religion officielle. La période qui suit en est une de réaction chrétienne contre le polythéisme et la philosophie antique.

L'abandon des sciences à la fin de l'empire romain L'empire romain se décompose au Ve siècle. La partie occidentale tombe aux mains des barbares germaniques qui se la partagent en petits royaumes et qui laissent l'infrastructure romaine à l'abandon. La partie orientale, qu'on connaîtra sous le nom d'*empire byzantin*, conserve son unité mais perd progressivement de sa vigueur. Les passions religieuses et sportives (les courses de char) et les révolutions de palais à Constantinople marquent beaucoup plus cette époque que l'étude des sciences.

L'un des épisodes les plus navrants de cette période est l'histoire d'Hypatie d'Alexandrie. HYPATIE (370/415), fille de THÉON d'Alexandrie, était philosophe, mathématicienne et astronome (comme son père d'ailleurs). Comme tous les savants de son époque, elle est plus connue pour son enseignement et ses commentaires des auteurs anciens que pour des contributions originales. Cependant, elle se distinguait par sa vive intelligence, son aplomb et la brillance de son enseignement. Sa popularité auprès de la haute société alexandrine excita la jalousie de l'évêque Cyrille d'Alexandrie. Il est cependant difficile d'affirmer si celui-ci fut à l'origine de l'émeute d'une troupe de moines qui, conduits par un certain Pierre, détruisa le Musée et assassina d'une manière atroce Hypatie.²⁰

Les institutions alexandrines, dont le Musée, déclinèrent progressivement après l'établissement officiel de la religion chrétienne dans cette ville. On ignore s'il en restait quoi que ce soit lors de l'invasion arabe.²¹ L'Académie de Platon, entretenue par les néo-platoniciens au début de l'ère chrétienne, fut fermée sur ordre de l'empereur Justinien en 525, qui lui reprochait de répandre des idées païennes. De toute façon, l'Académie n'était probablement que l'ombre de ce qu'elle avait été quelques siècles auparavant. Les membres de l'Académie s'exilèrent à *Jundishapur* (ou Gondeshapur), dans la Perse du roi Khosroès Anushirwan, le plus grand des rois sassanides. C'est aussi à Jundishapur que les chrétiens nestoriens se réfugièrent après avoir été chassés d'Édesse (auj. Urfa) par l'empereur en 481. Le roi Khosroès attira à Jundishapur des savants grecs et indiens. L'importance de cette ville tenait à sa position centrale, qui permit une fructueuse rencontre des sciences grecque, persane et indienne, et à son importance pour l'éclosion de la science arabe.

La figure la plus intéressante de la période byzantine est peut-être Jean PHILOPON (490/566), commentateur d'Aristote et néoplatonicien. Philopon est surtout connu par sa critique de la théorie du mouvement d'Aristote. Il s'oppose à l'idée que la vitesse d'un projectile soit maintenue par une action du milieu environnant, comme le croyait Aristote. Il pense plutôt que sa vitesse provient d'un *impétus* (élan) qui lui est donné par l'instrument de lancement (par exemple, l'arc, pour une flèche). Cette idée sera reprise indépendamment par Jean Buridan au moyen-âge.

En général, l'empire byzantin fut peu favorable au développement des sciences, pour des raisons essentiellement religieuses. Les Byzantins surent cependant conserver les textes de l'Antiquité et produisirent certaines innovations techniques (feu grégeois, automates) qui démontrent que la tradition des mécaniciens alexandrins (Héron) ne s'était pas perdue. Les Byzantins vendirent un certain nombre de textes aux Arabes et c'est par l'intermédiaire de ceux-ci que les chrétiens d'Occident en prirent connaissance, parfois via de multiples traductions (grec → syriaque → arabe → latin). Une anecdote, relatée par un Arabe au service de l'empereur byzantin, Mohammed ben Ichak, est cependant révélatrice du peu de cas que les Byzantins faisaient des connaissances antiques :

J'ai appris par Abu Ichak ben Chahram, qui l'a relaté dans une séance officielle, qu'il existe dans l'empire d'Orient un grand temple ancien, avec une porte à deux vantaux de fer comme il n'en a jamais été construit de plus grande. Les Grecs de l'antiquité, lorsqu'ils vénéraient encore les faux dieux, l'avaient érigé et y procédaient aux sacrifices. J'ai prié un jour le souverain de l'empire d'Orient de le faire ouvrir pour moi, mais il refusa sous prétexte que depuis l'époque où les

²⁰Malgré son recours à des assassinats politiques, notamment lors du concile d'Éphèse, Cyrille d'Alexandrie a été reconnu docteur de l'Église et sa canonisation ne fut jamais révoquée. Ce personnage douteux est à l'origine de la doctrine de l'Incarnation du Christ et a le plus contribué à l'expulsion des nestoriens de l'Église. Pour plus de détails à ce sujet, voir [33], chapitre 47.

²¹Une légende affirme que le calife Omar aurait détruit la bibliothèque après avoir déclaré "Si ces livres sont contraires au Coran, ils sont pernicieux ; s'ils sont d'accord avec le Coran, ils sont superflus." Cette histoire est très probablement fausse. On croit maintenant que la bibliothèque d'Alexandrie fut le plus endommagée lors des guerres civiles qui firent rage dans cette ville au IIIe siècle, en particulier lors d'un conflit entre l'empereur Aurélien et la reine Zénobie de Palmyre. On raconte que les manuscrits furent même utilisés pour chauffer les bains publics !

Romains de l'empire d'Orient sont devenus chrétiens, ce temple est resté fermé. Mais je ne me tins pas pour battu, car je lui avais rendu service à diverses occasions. Je renouvelai ma requête oralement et par écrit. Lorsque je participai à une session du Conseil, il le fit enfin ouvrir. Dans ce bâtiment de marbre se trouvaient des inscriptions et des statues peintes, comme je n'en ai jamais vu de semblables ni de plus belles. Il y avait là pour plusieurs chargements de chameaux d'ouvrages anciens. On peut dire des milliers. Une partie de ces documents était déchirée, une autre mangée par les vers. Après mon départ, la porte a été refermée.

Après la chute de Constantinople aux mains des Turcs (1453), plusieurs érudits grecs émigrèrent en Italie et apportèrent avec eux des textes anciens qui furent traduits directement du grec au latin, ce qui permit un retour aux sources de l'Antiquité, l'une des causes de ce qu'on appellera plus tard la *Renaissance*. Mais il est probable que nous ne connaissons aujourd'hui qu'une infime partie des oeuvres scientifiques produites par l'Antiquité.

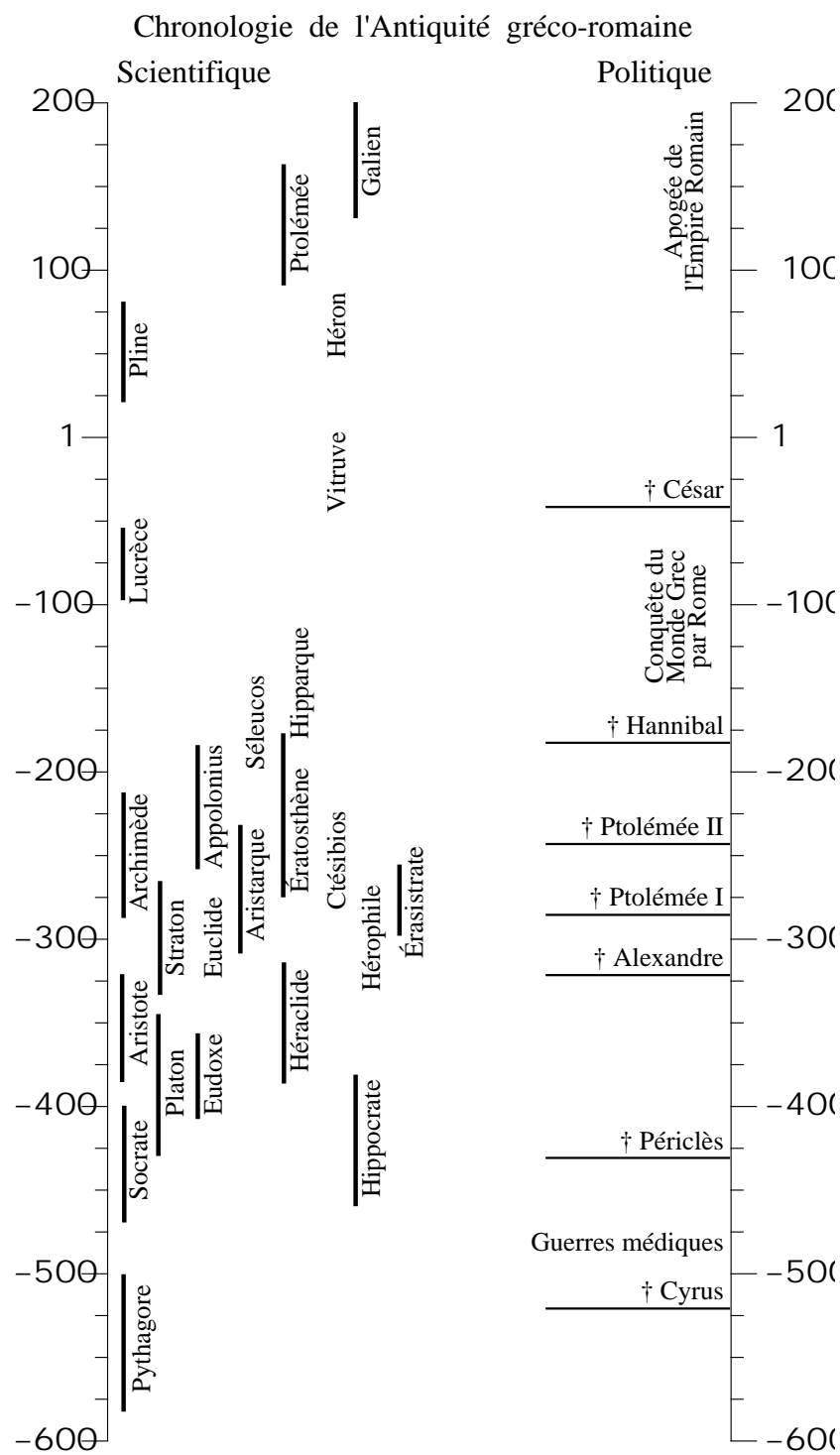


FIG. 2.15: Chronologie sommaire de la science grecque.

Chapitre 3

L'Orient et le moyen-âge

3.1 La Chine

La Chine dans l'histoire La Chine a été l'hôte d'une civilisation organisée dès la plus haute antiquité. Quoiqu'elle n'ait pas toujours été unifiée, elle a connu tout de même moins de bouleversements que le monde méditerranéen et a joui d'une stabilité ethnique et culturelle beaucoup plus grande.

Caractère de la science chinoise Les Chinois n'ont pas pratiqué de philosophie spéculative et déductive comme les Grecs. Leur science est à la fois plus pratique et plus basée sur l'observation. Le terme chinois pour "science", *kexue*, signifie "connaissance classificatrice". Les techniques de la Chine ancienne étaient en général supérieures à celles des Européens jusqu'au XVe siècle. Des astronomes, horlogers et géographes étaient au service du gouvernement.

La plus grande poussée culturelle et scientifique chinoise remonte à la période des royaumes combattants (–Ve/–IIIe siècles) et coïncide curieusement avec la période de plus grand progrès de la science grecque. La période suivante, pendant laquelle un empire bureaucratique s'installe (comme l'empire romain en Occident), marque aussi un ralentissement du progrès. On attribue ce ralentissement à la doctrine sociale confucianiste, qui tend à favoriser un régime stationnaire en réprimant l'égoïsme individuel et la concurrence, ce qui empêche l'émergence d'une bourgeoisie marchande, au profit d'une caste de fonctionnaires. Or, il semble que l'existence d'une bourgeoisie marchande soit très favorable au développement rapide des sciences et des techniques.¹

Innovations techniques des Chinois Même si nous ne faisons pas ici une histoire des techniques, signalons au passage quelques innovations chinoises qui ne se sont retrouvées en Occident que plus tard :

1. L'imprimerie, généralement sans caractères mobiles.²
2. La boussole. La première forme de boussole tire probablement son origine (vers le IIe siècle) de la géomancie pratiquée avec une cuiller de magnétite dont la partie convexe repose sur une surface de bronze. La boussole flottante est apparue avant 1125.
3. Le joint universel (dit *de Cardan* en Occident).
4. L'horlogerie mécanique.
5. La poudre à canon.
6. La fonte (c'est-à-dire du fer fondu et non simplement forgé).
7. Les étriers et les harnais pour les chevaux.
8. Les écluses.
9. Les navires à voiles multiples.

¹Du moins, dans l'interprétation marxiste de l'histoire des sciences.

²Les caractères mobiles ont aussi fait leur apparition en Chine, mais étaient semble-t-il très peu répandus.

TAB. 3.1: Chronologie politique de la Chine.

~-1750/-1025	Dynastie Shang : aristocratie guerrière. Métallurgie du bronze.
-1025/-256	Dynastie Zhou. -Ve/-IIIe siècles : époque des trois royaumes combattants. Confucius (Kongzi), Lao-Tseu (Laozi), Mencius (Mengzi). Métallurgie du fer et essor technique.
-221/-206	Dynastie Qin. Qin Shi Huangdi. La grande muraille. Mise à l'index de nombreux livres et exécution des lettrés. Unification des poids et mesures, de l'écriture, des essieux, etc.
-206/220	Dynastie Han. Instauration du mandarinat. Restauration du confucianisme.
220/581	moyen-âge chinois. Morcellement en 3 royaumes (Wei, Shu-Han et Wu). Influence du bouddhisme. Invasion des Huns (337).
581/907	Dynastie Sui (581/618), puis Tang (618/907). Unité restaurée. Importance croissante de la fonction publique.
960/1279	Dynastie Song et empires barbares : Liao, Xia occidentaux et Jin.
1279/1368	Dynastie Yuan (domination mongole). Qubilai Khan. Visite de Marco Polo. Subordination des Chinois, en particulier au sud.
1368/1644	Dynastie Ming. Autoritarisme croissant et repli de la Chine sur elle-même.
1644/1912	Dynastie Qing (mandchoue). Contrôle de l'Asie centrale et du Tibet. Ingérence progressive des Européens. Révolution en 1912.

Mathématiques Les Chinois ont utilisé, dès le –XIVe siècle, un système de numération positionnel à base 10. Leur langue comportait des mots monosyllabiques pour tous les nombres de 1 à 10, en plus de 100 et 1000. Ces mots sont toujours les mêmes aujourd'hui. Les calculs étaient donc relativement simples en Chine, par rapport à la Grèce, ce qui explique leurs plus grandes prouesses en algèbre, mais aussi leur faiblesse en géométrie. Le zéro ne fut introduit qu'au VIIIe siècle, en provenance de l'Inde. L'abaque (ou boulier) a été inventé entre les IIIe et VIe siècles et permit de faire rapidement des calculs arithmétiques compliqués.

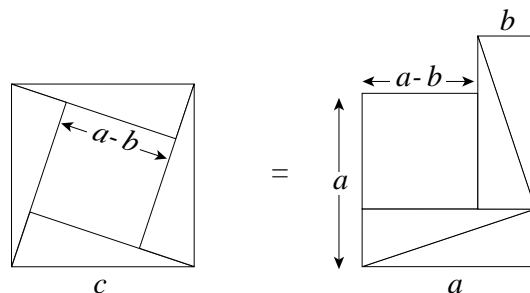


FIG. 3.1 : Preuve du théorème de Pythagore donnée par Tchao Kiun k'ing. À gauche, quatre copies d'un triangle rectangle de côtés a , b , c sont disposés en un carré de côté c , dont l'aire est c^2 . Un carré plus petit, de côté $a - b$, se forme naturellement au milieu. À droite, les cinq figures géométriques de gauche (les quatre triangles et le carré) sont disposées de telle sorte qu'elles forment un carré de côté a juxtaposé à un carré de côté b . La somme des aires étant égales des deux côtés de l'égalité, on a $a^2 + b^2 = c^2$.

La géométrie chinoise était beaucoup moins développée que celle des Grecs. Les Chinois connaissaient

cependant le théorème de Pythagore, dont une preuve ingénieuse fut donnée par Tchao Kiun k'ing au II^e siècle. Leur valeur de π est remarquablement précise : au III^e siècle, Lieou Houei, par inscription d'un polygone de 3072 côtés dans un cercle, obtint $\pi \approx 3,14159$. Tsou Tchong Tche, un peu plus tard, obtint

$$3,1415926 < \pi < 3,1415927 \quad (3.1)$$

Les connaissances algébriques des Chinois apparaissent dans un livre de l'époque Han : *L'art du calcul en neuf chapitres*. On y trouve notamment :

1. La solution d'équations linéaires à une variable par la méthode de la fausse position.
2. La solution d'équations linéaires à plusieurs variables en faisant appel à des tableaux similaires aux matrices.
3. La solution d'équations quadratiques.

Ces techniques de calcul étaient cependant toujours appliquées à des problèmes pratiques.

Astronomie Les Chinois ont utilisé une année de $365\frac{1}{4}$ jours dès les premiers siècles de leur histoire. Ils ont constitué des catalogues d'étoiles importants (un catalogue de l'époque des royaumes combattants compte 1464 étoiles) et ont minutieusement observé les novae et les comètes. Ces observations anciennes rendent encore service aux astrophysiciens. En particulier, l'observation de la nova de 1054 a permis d'expliquer l'origine de la nébuleuse dite *du crabe*. Les Chinois utilisaient un système de coordonnées célestes *équatoriales*, comme est d'usage aujourd'hui en astronomie.

La cosmologie ancienne des Chinois est naïve. Cependant, dès l'époque Han, on affirme qu'il n'y a pas de voûte céleste (la "nuit étendue") et que les astres flottent dans le vide.

Dès l'an 527, on fait mention des fossiles marins et on en donne l'explication correcte : la formation des montagnes au fond de l'océan.

Physique La physique chinoise repose sur deux principes (le yin et le yang) et sur cinq éléments (ou agents) : la terre, le feu, le métal, l'eau et le bois. Les deux principes sont en opposition constante et la Nature cherche toujours à en restaurer l'équilibre. On associe les qualités suivantes aux deux principes :

1. Yin : obscur, froid, humide, féminin, impair.
2. Yang : clair, chaud, sec, masculin, pair.

Quant aux cinq éléments, ils correspondent aussi aux...

1. cinq saveurs (aigre, amer, doux, astringent, salé),
2. cinq endroits (nord, est, sud, ouest, centre),
3. cinq couleurs (bleu-vert, rouge, jaune, blanc, noir),
4. cinq notes de la gamme chinoise (pentatonique).

La dichotomie matière/esprit, si marquée chez les Grecs (Platon, en particulier), n'existe pas chez les Chinois.

3.2 L'Inde

Les Indiens védiques Au milieu du deuxième millénaire avant notre ère, au début de l'âge du fer (~ -1500), des peuples de langue aryenne envahissent progressivement l'Iran et le nord de l'Inde. Les envahisseurs de l'Inde sont dits *aryens védiques* et leur langue est le *sanskrit*, de nos jours encore langue sacrée de l'Inde. Ces peuples élaborent des textes sacrés appelés *Vedas* (qui signifie "savoir"), dont le principal est le Rig-Veda (Veda des hymnes). Les Veda contiennent par allusion certaines conceptions du monde matériel, en particulier sur un certain ordre normal du monde (*arta*). Au cours du premier millénaire avant notre ère, des compléments aux Vedas, les Brâhmana, sont rédigés. Le système du monde védique est décrit dans l'un d'eux : le *Jyotishavedânga*. L'immense influence de la religion védique se fait sentir dans toutes les connaissances "scientifiques" des Indiens. En fait, le savoir astronomique et mathématique est difficilement dissociable de la religion pour eux.

TAB. 3.2: Chronologie sommaire de l'Inde.

~ -2500/ - 1500	Civilisation de l'Indus. Mohenjo-dâro, Harappâ.
-1500/ - 1000	Invasion des Aryens védiques. Rédaction des Védas.
-1000/ ~ -500	Rédaction des Brâhmana.
~ -500/ - 326	Domination des Perses au N.-O. Bouddha (-560/-480).
~ -320/ - 176	Unification : empire des Maurya. Asoka (-269/-232). Période classique.
~ -176/320	Morcellement.
320/550	Unification : empire des Gupta.
550/1206	Morcellement. IXe/XIe : influence en Asie du sud-est. Influence croissante de l'Islam.
1206/1526	Domination du sultanat de Dehli (1206/1526).
1526/1858	Empire Mogol. Domination progressive des Occidentaux. Les Anglais dominant à partir de 1763.

Astronomie Le indiens védiques accordaient une grande importance à l'astronomie, en raison de leur croyance profonde au *cyclisme*, c'est-à-dire la répétition cyclique de la course du monde et des événements. La connaissance de la période de révolution des astres était donc importante. La grande longueur de certains cycles a forcé les indiens à développer un système de numération pouvant décrire de très grands nombres.

Le calendrier védique utilise une année de 12 mois de 30 jours (soit 360 jours). Un mois intercalaire de 25 ou 26 jours est ajouté à tous les cinq ans. Chaque jour est divisé en 15 "heures" (ou moments) de jour et 15 moments de nuit. Le nombre de ces moments dans une année est donc 10 800, qui est aussi le nombre d'unité métriques (vers) dans le Rig-Veda ! Une certaine mystique des nombres semble caractériser la philosophie védique.

Il semble que les Grecs aient très tôt influencé l'Inde en astronomie, par les contacts lors des conquêtes d'Alexandre et aussi par la suite. Cependant, les Indiens ont procédé, pour des raisons religieuses, à des observations minutieuses du mouvement de la Lune et du Soleil.

À signaler est le *Sûryasiddhânta* (IVe siècle), traité portant sur le système du monde. On y fait vivre les dieux au pôle nord et les démons au pôle sud, de sorte qu'une journée pour les dieux équivaut à une année pour les hommes. Ce traité mentionne la précession des équinoxes. Signalons aussi l'astronome Âryabhata (né en 476), qui perfectionna le système des épicycles emprunté aux Grecs et qui croyait en la rotation de la Terre. Il utilisait la valeur $\pi = 3,1416$. En trigonométrie, Âryabhata est aussi l'inventeur du *sinus* (~ 510), par opposition à la corde utilisée par les Grecs. Le mot qui désigne le sinus en sanskrit est *jîva*, qui veut précisément dire "corde". Les arabes ont simplement adopté une translittération du même mot dans leur langue, ce qui a donné *jaib*, qui est aussi, par hasard, le mot désignant une cavité. Les auteurs occidentaux ont donc traduit la notion par le mot latin signifiant "cavité", soit *sinus*.

Mathématiques Nous ne disposons d'aucun traité de mathématiques datant des périodes védique et brahmanique. Cependant, la langue de l'époque peut nommer toutes les puissances de 10 jusqu'à 10^8 . Dans la période classique qui suit, toutes les puissances jusqu'à 10^{23} ont un nom particulier !

Les mathématiques indiennes sont subordonnées à l'astronomie : il n'existe pas de traité de mathématiques pures et les connaissances mathématiques sont exposées dans les traités d'astronomie. D'autre part, aucune importance ne semble être accordée aux preuves, ce qui constitue un recul majeur par rapport aux Grecs.

L'héritage le plus durable que la science indienne a laissé à l'humanité est sans conteste le système de numération décimal de neuf chiffres plus le *zéro*. Dans l'antiquité, les Indiens utilisent un système de numération

TAB. 3.3: Chronologie sommaire de la civilisation arabe.

622/750	Période des conquêtes. Califat des Omeyades (Damas).
750/936	Califat des Abbassides (Bagdad). Califes Mansur, Harun al-Rashid, Al-Ma'mun. Développement des arts et des sciences.
936/1055	Domination des shi'ites iraniens (dynastie des Buyides).
909/1171	Règne des Fatimides en Afrique et en Égypte (Le Caire). L'Égypte reconquise par Saladin (1171).
756/XIe siècle	Califat Omeyade de Cordoue. Apogée de l'Espagne musulmane. Prise de Cordoue par les Chrétiens (1236).
1055/v. 1258	Règne effectif des Turcs Saljûqides en Orient (le sultan règne au nom du calife). Dernier calife exécuté par les Mongols (1258).
XIIIe- XIVe siècle	Domination des Mongols en Orient. États Saljûqides vassalisés.
XIVe siècle/1918	Formation de l'empire Ottoman (Turcs) : Balkans, Iraq, Afrique du Nord. Prise de Constantinople (1453). Siège de Vienne (1682).

semi-positionnel, avec des symboles différents pour 1-9, 10-90, 100-900, etc. Il est généralement admis que le zéro fit son apparition au Ve siècle, les chiffres de 1 à 9 étant plus anciens. Cependant, la plus vieille inscription encore visible utilisant ce système décimal complet ne date de l'an 876. De l'Inde, le système décimal avec zéro gagna la Chine vers l'est et, vers l'ouest, le monde arabe au IXe siècle. De là, il se répandit en Occident au XIIe siècle. Signalons cependant que les grecs de l'époque hellénistique utilisaient déjà le zéro, mais dans le système sexagésimal, utilisé surtout en astronomie. Il est probable que c'est par l'influence grecque que le concept est apparu en Inde. Le mot grec désignant le zéro, *ουδεν*, serait, par sa première lettre, à l'origine du symbole pour le zéro.

Il est difficile d'établir l'origine graphique des chiffres, sauf pour 1, 2 et 3, qui sont clairement des formes cursives de |, = et ≡. Curieusement, les mots français *zéro* et *chiffre* ont la même origine : le zéro hindou était *sūnya*, qui veut dire "le vide", ce qui donna le mot arabe *ṣifr*, d'où vient directement *chiffre*. Du même mot arabe vient la désignation latine *zephirum* (traité de Fibonacci, début du XIIIe siècle), qui donna l'italien *zero*, que le français a emprunté.

3.3 Le monde arabe

Panorama de la civilisation arabe La religion de Mahomet, ou *Islam* ("soumission à Dieu") a été fondée au début du VIIe siècle en Arabie, pays jusque-là d'importance secondaire. En un siècle (jusqu'en 750), les Arabes ont conquis tout le Proche-Orient, l'Afrique du Nord et l'Espagne, un rythme de conquête jamais vu. Ils s'emparèrent ainsi de plus de la moitié de l'empire romain d'Orient (empire byzantin) et de la totalité de la Perse sassanide, contrées hautement civilisées. En fait, les Arabes imposèrent leur religion aux peuples conquis, mais assimilèrent à leur profit les connaissances de ces mêmes peuples.

Caractère de la Science arabe Premièrement, la science arabe n'est pas seulement la science des peuples arabes, mais la science *écrite* en arabe, ce qui inclut de nombreux savants persans et même non musulmans (juifs). En fait, pendant le premier siècle de l'Islam, la majorité des savants en territoire musulman sont chrétiens. La religion islamique fut, dans une certaine mesure, plus favorable au développement des connaissances scientifiques que la religion chrétienne à la même époque. Non seulement les connaissances astronomiques sont-elles importantes pour déterminer précisément le début du Ramadan et la direction de la Mecque, mais le Coran encourage l'étude de la Nature :

Celui qui chemine à la recherche de la science [ilm], Dieu chemine avec lui sur la voie du Paradis.

TAB. 3.4: Figures principales de la science arabe.

Jabir Ibn-Hayyan [Geber] (VIIIe siècle)	Figure dominante de l'alchimie arabe et occidentale. Exerça une énorme influence sur la chimie jusqu'au XVIIIe siècle.
Al-Khwarizmi (v.800/v.847)	Auteur du <i>Précis sur le calcul de al-jabr et de al-muqabala</i> (algèbre). Introduit la numération décimale indienne en Islam. Solution des équations quadratiques. Son nom latinisé a donné le mot <i>algorithme</i> .
Abu Kamil (IXe siècle)	Disciple de Al-Khwarizmi. Manipulation d'expressions irrationnelles.
Al-Battani [Albategnius] (IXe siècle)	Astronome et mathématicien. Introduit les sinus et les cosinus dans les mathématiques arabes.
Al-Razi [Rhazès] (v.854/925-935)	Médecin. Auteur des <i>Supercherries des prophètes</i> . Attaqua la religion et les dogmes (scientifiques ou non). Croyait au progrès continu de la science.
Abu al-Husayn al-Sufi [Azophi] (fin Xe siècle)	Astronome : <i>Livre des constellations des étoiles fixes</i> . Constructeur d'instruments (astrolabe).
Al-Biruni (fin Xe siècle)	Astronome, géographe, mathématicien. Auteur de 13 000 pages de textes techniques.
Ibn-Al-Haytham [Alhazen] (965/1040)	Le plus célèbre physicien du monde arabe. Théorie sur la lumière et la vision : l' <i>Optique</i> .
Ibn-Sina [Avicenne] (980/1037)	Médecin et philosophe. Auteur du <i>Canon de la médecine</i> .
Al-Khayyam [Omar Khayyam] (1048/1131)	Médecin, astronome et poète, auteur des <i>rôbaïates</i> . Théorie géométrique (par sections coniques) des équations cubiques. Réforme du calendrier persan.
Al-Karagi (XIe siècle)	Auteur du <i>livre suffisant sur la science de l'arithmétique</i> . Étudie l'algèbre des polynômes.
Al-Samaw'al (?/1174)	Disciple de Al-Karagi. Utilise le symbolisme des tableaux pour l'algèbre des polynômes. Précurseur des fractions décimales. Nombres négatifs. Approximation d'un irrationnel par une suite de rationnels.
Ibn Rushd [Averroès] (1126/1198)	Philosophe et commentateur d'Aristote. Version de la théorie des sphères d'Eudoxe avec 47 sphères (au lieu des 55 du temps d'Aristote). Notion de double vérité (rationnelle vs révélée).
Al-Kashi (?/1429)	Mathématicien. Énonce la pratique des fractions décimales. Donne 2π à 16 décimales. Étudie les approximations numériques et la trigonométrie.

Les Grecs ont énormément inspiré les Arabes. On peut considérer, *grosso modo*, que la science Arabe est le prolongement logique de la science grecque, ou du moins, de ce qui en restait à l'époque romaine. Citons Al-Biruni :

Nous devons nous en tenir aux sujets étudiés par les Anciens et apporter des améliorations là où c'est possible

Cependant, les Arabes ont une mentalité plus pratique que les Grecs de l'époque classique et ne pratiquent pas la "science pour la science" : les applications pratiques sont toujours présentes à leur esprit.

Immédiatement après leur conquête du Proche-Orient, les Arabes se sont montrés ouverts aux cultures existantes (grecque-byzantine et persane) et ont pu ainsi assimiler les connaissances accumulées depuis des siècles par ces civilisations, sans pour autant remettre en question leur religion. Les textes scientifiques de l'Antiquité furent traduits du grec vers l'arabe, souvent par l'intermédiaire du syriaque (l'une des formes tardives de l'araméen). Le calife Al-Ma'mun (814/833) fonda à Bagdad la *Bayt al-Hikma* ("Maison de la Sagesse"), institution chargée entre autre de traduire les textes grecs. Beaucoup de traducteurs étaient chrétiens et le calife importait les manuscrits de Constantinople quand il ne les avait pas en sa possession.

Le développement de la science arabe est important surtout du VIII^e au XI^e siècle autour de Bagdad et du Xe au XIII^e siècle autour de Cordoue. La science arabe stagne et décline à partir du XIV^e siècle. Les catastrophiques invasions mongoles sont en partie responsables de ce déclin, mais aussi un changement d'attitude religieuse, qui insiste plus sur le respect de l'autorité des auteurs anciens.

Par rapport à l'Occident, les Arabes ont joué un double rôle sur le plan scientifique :

1. Transmettre les connaissances grecques (et indiennes), qu'ils avaient assimilées.
2. Commenter ces connaissances antiques, en plus de les transmettre.
3. Établir des résultats nouveaux et originaux, surtout en mathématiques et en médecine.

Les contacts avec l'Occident se firent surtout par les zones frontalières : plusieurs occidentaux allèrent étudier en Espagne musulmane ou en Sicile.

Il est impossible de rendre justice à la science arabe en si peu de lignes. Nous nous contenterons d'en indiquer, au tableau 3.4, les représentants les plus marquants par leurs innovations.

Al-Khwarizmi AL-KHWARIZMI a expliqué clairement dans son traité comment résoudre des problèmes à une inconnue en utilisant deux opérations :

1. *Al-jabr* : transposer certains termes dans une équation pour éliminer les valeurs négatives. Par exemple, transformer $x = 40 - 4x$ en $5x = 40$.
2. *Al-muqabala* : équilibrage des valeurs positives restant dans l'équation. Par exemple, $50 + x^2 = 29 + 10x$ devient $x^2 + 21 = 10x$.

Tout ceci peut paraître puéril, mais la notation algébrique n'existait pas à l'époque et les manipulations et équations étaient énoncées en langage courant. Le mot *al-jabr* est devenu *algebra* en latin et *algèbre* en français. Le nom latinisé d'Al-Khwarizmi est *Algorismus*, à l'origine du mot français *algorithme*.

Al-Khwarizmi explique la solution à l'équation quadratique, en particulier le fait de compléter le carré, de manière géométrique, en s'inspirant d'Euclide. Voyons comment il procède par un exemple (fig. 3.2). Supposons qu'on ait à résoudre l'équation $x^2 + 10x = 39$. Soit AB la longueur représentant l'inconnue x . Construisons un carré ABCD avec cette longueur. Prolongeons ensuite les segments DA vers DH et DC vers DF, de sorte que les longueurs AH et CF soient la moitié du coefficient de x dans l'équation, soit 5. La somme des surfaces des régions I, II et III est alors $x^2 + 2 \cdot 5x$, et donc égale à 39. Complétons le carré en ajoutant la région IV, d'aire $5 \cdot 5 = 25$, de chaque côté de l'équation. L'aire totale du grand carré est alors $(x + 5)^2 = 39 + 25 = 64$. Il suffit ensuite de prendre la racine carrée et $x + 5 = 8$, ou encore $AB + CF = 8$. Donc $AB = 8 - 5 = 3$, qui est la racine recherchée. Bien sûr, cette approche géométrique interdit de considérer les racines négatives (ici, $x = -13$) et encore moins les racines complexes. Notons encore que l'algèbre littérale n'est utilisée ici que pour soutenir l'explication et était inconnue à l'époque.

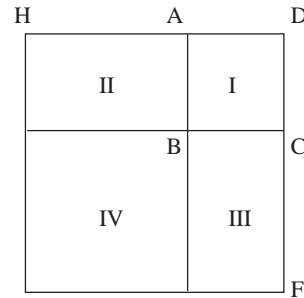


FIG. 3.2: Diagramme utilisé par Al-Khwarizmi pour expliquer sa solution à l'équation quadratique.

Al-Kashi L'astronome et mathématicien Persan AL-KASHI (mort en 1429) est la dernière grande figure de la science arabe. Dans *la clef de l'arithmétique* (1427) Il donne un exposé pédagogique des fractions décimales (introduites en Europe à la fin du XVIe siècle seulement), il montre comment extraire des racines carrées, comment procéder à l'arithmétique sexagésimale. Il donne même une estimation du nombre π exacte à 16 décimales, par la même méthode qu'Archimède, mais en effectuant des calculs numériques plus efficaces.

3.4 Le moyen-âge occidental

3.4.1 Qu'est-ce que le moyen-âge ?

Les préjugés élémentaires envers le moyen-âge le décrivent comme une période d'ignorance, sinon de barbarie et de fanatisme religieux, s'étendant de la chute de l'Empire romain d'Occident (476) à la renaissance littéraire du milieu du XVe siècle. Rien n'est plus injuste et exagéré. Une vision moins grossière permet de distinguer quatre périodes principales pendant cette époque :

1. *Le Haut moyen-âge* (Ve / Xe siècle) est plus conforme aux préjugés classiques. Le système économique romain s'est écroulé. Les routes, canaux et aqueducs sont laissés à l'abandon. L'Occident est divisé en royaumes barbares, parmi lesquels celui des Francs est le plus puissant. L'Église, par ses monastères, sauvegarde une petite quantité de manuscrits antiques. L'enseignement est dominé par la pensée de Saint-Augustin (354/430) qui, sans abandonner l'usage de la raison, juge que la foi doit prédominer. Saint-Augustin appelle les chrétiens à construire la *Cité de Dieu* plutôt que la *Cité des Hommes*, ce qui contribue à dévaloriser les innovations techniques et scientifiques. L'Église n'est cependant pas la seule responsable du déclin des sciences pendant cette période : au contraire, elle préserve les connaissances qui lui tombent sous la main. La principale cause de l'oubli des sciences est avant tout *économique et politique* : les guerres féodales fréquentes, les nouvelles invasions (Vikings et Magyars au IXe siècle), la misère généralisée. La brève renaissance carolingienne (sous Charlemagne et son fils) n'a pas d'effets durables.
2. *Le réveil* (XIe / XIIe siècle). Pendant cette période la structure féodale se stabilise et la population augmente considérablement, grâce notamment à plusieurs innovations techniques : la charrue lourde avec verneur, le harnais d'épaule pour le cheval de trait, les moulins à eau, l'assolement triennal, etc. On croit que la population européenne double entre l'an mil et l'an 1200. Le commerce se développe. Le centre de gravité européen se déplace vers le nord (Nord de la France, Flandres). C'est l'époque des Croisades. C'est de cette époque que datent les premières traductions en latin des ouvrages arabes, principalement à Tolède, en Espagne, la principale voie de communication entre la civilisation arabe et l'Occident. Gardons cependant à l'esprit que, pendant cette période et la suivante, aucune ville d'Occident (Paris, Londres ou Rome) n'arrivait à la cheville de la splendeur et de la richesse de Constantinople ou même de Cordoue ou de Bagdad.
3. *L'apogée* (XIIIe siècle/v. 1348). C'est l'époque des grandes cathédrales gothiques. Les villes se développent, ainsi que le commerce. Le royaume de France compte peut-être autant d'habitants (près de

20 millions) qu'à l'époque de Louis XIV. Saint-Louis assure la stabilité et la paix intérieure de son royaume et envoie une ambassade auprès des Mongols. Marco Polo accomplit son voyage en Chine. Les Universités (Paris, Oxford, Bologne, Naples, Cambridge, etc.) se développent : la *scolastique* y domine. À cette époque, on peut affirmer que l'Occident prend la relève du monde arabe dans le progrès des sciences.

4. *Le déclin* (v. 1348/XVe siècle). La *peste noire*, maladie contagieuse provenant d'Asie (13 millions de victimes en Chine en 1337/1339), fit son apparition en Europe vers 1348. On estime qu'elle fit 25 millions de victimes en Europe, soit environ le tiers de la population.³ Certaines terres agricoles furent abandonnées pendant deux siècles et il fallut attendre le XVIe ou le XVIIe siècle pour que la population retrouve son niveau précédent. L'enseignement des Universités devient figé et rigide, mais, paradoxalement, les techniques progressent, peut-être sous la pression des contraintes imposées par la dépopulation : progrès de l'exploitation des forces motrices naturelles (moulins à vent et à eau) et animales ; de la navigation (cartographie et navires) ; perfectionnement de l'imprimerie, etc. Certaines de ces innovations semblent venir de Chine, alors gouvernée par une dynastie mongole et ouverte aux voyageurs occidentaux.

3.4.2 Pénétration en Occident de la science gréco-arabe

Vers l'an mil, l'Occident est manifestement très en retard sur les Byzantins et sur les Arabes sur le plan économique et scientifique. Plusieurs occidentaux⁴ se déplacèrent vers les centres de culture arabe (Sicile, Espagne) pour y parfaire leur éducation. Ceux-ci en rapportèrent des oeuvres écrites en Arabe qui furent ensuite traduites en latin pour l'usage occidental.

Parmi ces Occidentaux qui étudièrent dans le monde arabe, le plus illustre est le Français GERBERT D'AURILLAC (v.940/1003). Il séjourna en Espagne (967/969) et dévora les textes scientifiques disponibles. Il introduisit l'abaque et les chiffres arabes en Occident. Il écrivit un *traité de l'astrolabe* et construisit une sphère représentant le mouvement des astres. Il devint pape (Sylvestre II) en 999. Il est aussi réputé avoir possédé ou construit divers automates, dont un orgue à vapeur.

Signalons aussi l'Anglais ADÉLARD DE BATH (1090/1160), qui voyagea en Orient (Damas, Bagdad, Jérusalem). Il traduisit de l'arabe en latin les *Éléments* d'Euclide, l'*Almageste* de Ptolémée et le *Liber ymaginarum* (traité d'arithmétique) d'Al-Khwarizmi.

Le problème de la traduction fut au départ assez ardu, car plusieurs mots arabes n'avaient pas leur équivalent en latin. C'est ainsi que la langue latine et plus tard la langue française importèrent un certain nombre de mots arabes. Citons-en quelques uns :

alambic, alcali, alchimie, alcool, Aldébaran, algèbre, algorithme, Altaïr, artichaut, azimut, azur, Bételgeuse, borax, café, camphre, chiffre, élixir, nadir, nuque, Rigel, safran, talc, zénith, zéro, zircon

Les traductions sont nombreuses à cette époque et procèdent souvent par l'intermédiaire d'un Juif qui connaît à la fois l'arabe et le latin, ou qui du moins connaît à la fois l'arabe et la langue vulgaire (castillan, français). Le Juif Savasorda (Abraham bar Hiyya de Barcelone) a traduit plusieurs textes de l'arabe à l'hébreu à l'intention des communautés juives de France et sa collaboration avec Platon de Tivoli a permis de traduire plusieurs de ces textes en latin.

Tolède, à la frontière de l'Espagne chrétienne et de l'Espagne musulmane, est au XIIe siècle le principal centre de traduction des oeuvres arabes en latin. Parmi les oeuvres traduites, signalons :

1. *Liber Algorismi de numero Indorum* ("le livre d'Al-Khwarizmi sur les chiffres indiens") et l'*algèbre* d'Al-Khwarizmi.
2. La *Planisphère* de Ptolémée (l'original grec est aujourd'hui perdu) et l'*Almageste*.

³En Angleterre seulement, 28% de la population mourut en 1348/1349 et encore 13% en 1375.

⁴Les chrétiens de l'Occident sont souvent appelés *Latins* dans le contexte médiéval, pour les opposer aux chrétiens grecs orthodoxes et pour souligner l'utilisation de la langue latine parmi les gens instruits. Parmi les termes utilisés par les Orientaux pour désigner les occidentaux, mentionnons *roumi* (une déformation de *romain*) et *farandji* (une déformation de *franc*).

3. *De mensura circuli* (la mesure du cercle) d'Archimède.
4. Le *Canon* d'Avicenne.
5. Des oeuvres d'Aristote, dont la plupart des traités physiques.

En général, les connaissances scientifiques de l'Antiquité nous sont parvenues par l'intermédiaire des Arabes, avant le XIIe siècle. Mais assez tôt, les versions originales grecques furent traduites directement en latin, ce qui en améliora grandement la précision et la fidélité à l'original. Les relations commerciales avec l'empire byzantin, ainsi que les croisades, firent qu'un grand nombre de manuscrits grecs furent importés en Occident et traduits, ce qui nécessita aussi un renouveau de l'étude de la langue grecque en Occident.

Fait significatif, les ouvrages grecs à caractère non scientifique (métaphysique, histoire ou littérature) intéressaient beaucoup moins les Arabes et ne sont parvenus en Occident que plus tard, à l'aube de la Renaissance. Ce que C.P. Snow appelle les *deux cultures* (la scientifique et la littéraire) ont donc recolté l'héritage grec à deux époques différentes. Le mépris du moyen-âge que laissent souvent paraître les humanistes de la Renaissance est peut-être justifié du point de vue littéraire, mais beaucoup moins en ce qui a trait aux sciences et aux techniques, où la Renaissance n'a pas innové tellement plus que les deux ou trois siècles qui la précèdent. Encore faut-il remarquer un net déclin de l'innovation intellectuelle dans les universités de la fin du moyen-âge (XIV-XVe siècles), alors que la scolastique s'était transformée en un système rigide et stérile.

3.4.3 Les universités et la scolastique

À partir de l'an mil, l'Occident voit apparaître quelques écoles, la plupart centrées autour d'un évêché. La plus célèbre est l'École de Chartres, fondée au début du XIe siècle par un disciple de Gerbert d'Aurillac, l'évêque Fulbert. Les membres de cette école croient non seulement à la valeur des auteurs anciens (même païens), mais aussi à la possibilité de progrès. Citons Bernard de Chartres :

Nous sommes comme des nains montés sur les épaules des géants, si bien que nous pouvons voir plus de choses qu'eux et plus loin, non pas que notre vision soit plus perçante et notre taille plus haute, mais parce que nous nous élevons grâce à leur taille de géant.

Le XIIIe siècle voit le développement des universités. Une université est au départ une école relevant d'une cathédrale ou d'un monastère qui reçoit une charte du pape confirmant son autonomie par rapport aux autorités locales. Le mot *universitas*, en latin médiéval, désigne une communauté, un rassemblement, une union. Les plus anciennes universités d'Europe sont :

1. Bologne (1119), spécialisée en Droit.
2. Paris (*Universitas magistrorum et scholarium*), fondée vers 1170 ; des écoles importantes existaient avant cette date.
3. Oxford (1133), fondée par des étudiants insatisfaits de l'enseignement des écoles de Paris.
4. Cambridge (1209), fondée par des maîtres et des étudiants chassés d'Oxford.
5. Montpellier (1289). Des écoles de médecine et de droit y existaient déjà au XIIe siècle.

L'université typique compte quatre facultés : les Arts, le Droit, la Médecine et la Théologie. Le jeune homme entre à l'université vers l'âge de 14 ans, pour y faire un baccalauréat ès Arts, suivi s'il le désire d'une maîtrise, qui peut durer de deux à trois ans, suivi enfin d'un doctorat, qui peut être très long (une dizaine d'années en théologie, la faculté où les études sont les plus longues).

Les frictions entre étudiants et citoyens étaient nombreuses et les universités finirent par obtenir une certaine immunité juridique.⁵ L'Université de Paris devint rapidement la plus importante de l'Occident, surtout en matière de théologie où son autorité égalait celle du Pape. Paris était alors divisé en trois parties : la *Cité* (l'île de la cité, avec la cathédrale et le palais royal), la *Ville* (la rive droite, secteur des bourgeois) et l'*Université* (la rive gauche). Cette dernière partie fut surnommée *quartier latin*, en raison de la langue parlée par les universitaires. Vers 1500, l'Europe compte environ 50 universités. Chacune d'entre elles contribue au prestige de sa ville et de son prince et fournit les lettrés capables d'administrer l'État.

⁵Par exemple, en 1200, le prévôt (chef de police) de Paris fit pendre cinq étudiants à la suite d'une rixe. Le roi Philippe-Auguste désavoua son prévôt et accorda aux universitaires un privilège d'immunité : le prévôt perdait toute autorité sur eux.

Le curriculum élémentaire L'étudiant (ou *escolier*) devait premièrement maîtriser les matières de base, divisées en deux groupes : le trivium et le quadrivium. Le *trivium*, comme son nom l'indique, comportait trois éléments : la grammaire, la logique et la rhétorique. L'étudiant devait donc maîtriser la langue latine (grammaire), ensuite les règles de raisonnement qui mènent à la vérité (logique) et enfin apprendre à s'exprimer de manière rigoureuse et élégante (rhétorique). L'adjectif *trivial*, qui désigne en français une chose simple et banale, et en anglais une chose évidente et facile, est tiré du mot *trivium*, en raison du caractère élémentaire de son contenu. Le *quadrivium* comportait quatre éléments :

1. l'arithmétique : essentiellement, apprendre à compter, éventuellement à l'aide du système arabo-indien.
2. la géométrie : maîtriser le raisonnement mathématique par l'étude d'Euclide (typiquement les trois premiers livres des *Éléments*), et un peu de géographie.
3. l'astronomie : Se familiariser avec les systèmes astronomiques de l'époque (Eudoxe et peut-être Ptolémée) dans le but de comprendre le calendrier et de pouvoir déterminer la date de Pâques.
4. la musique, avec un peu de physique (un mélange pythagoricien).

Notons que le quadrivium est de nature essentiellement scientifique, et que l'enseignement de l'époque n'accordait aucune place à la littérature ou à l'histoire, bref, aux sciences humaines. Les médiévaux étaient passablement ignorants des lettres anciennes et de l'histoire, comme en font preuve les anachronismes frappants que contiennent les oeuvres d'art de l'époque quand elles cherchent à représenter les scènes de la vie du Christ. Les lettres gréco-latines seront déterrées à la fin du moyen-âge seulement, en Italie : ce sera le début de l'humanisme et de la Renaissance littéraire.

Le terme *scolastique* désigne l'enseignement conféré dans les universités de l'époque ainsi que la méthode utilisée. En voici une brève description :

Les méthodes d'enseignement et d'exposition en usage dans les écoles, la *scolastique*, débutent par la *lectio*, la lecture, terme qui possède alors un sens très technique. L'enseignant, qui peut être un simple bachelier, lit le texte mais aussi le commente. Dans cette lecture on distingue trois niveaux d'interprétation : selon la *littera* (lettre), il s'agit d'expliquer simplement les mots et les phrases ; selon le *sensus* (sens), on doit alors chercher la signification du texte, quitte à le traduire dans un langage plus conforme aux habitudes des enseignés ; enfin, en dégager le sens profond, en acquérir la véritable intelligence par la *sententia*. Premier stade indispensable de la scolastique, la lecture donne naissance à la *quæstio* (question). Elle naît des difficultés rencontrées dans le texte, puis en vient à servir de cadre, de méthode pour exposer un sujet mis en cause, non qu'on en doute effectivement, mais parce que le procédé permet de mieux développer une argumentation. Au-delà, la question se transforme en *disputatio* (dispute), exercice plus rare, au cours duquel le maître, toujours un docteur, lançait le débat par un exposé ; intervenaient alors, pour discuter les propositions, les autres maîtres, puis les bacheliers, enfin les étudiants. Le bachelier du maître qui avait exposé devait répondre aux questions, le maître gardait le silence. Dans une seconde séance, le maître "déterminait" lui-même ; il reprenait les arguments, les classait et en tirait ses propres conclusions.⁶

3.4.4 Foi et raison

Le thème récurrent qui préoccupe les esprits médiévaux face à la philosophie grecque est le conflit possible entre la raison, représentée de manière exemplaire par le système philosophique d'Aristote, et la foi chrétienne. Signalons premièrement que les universités sont avant tout des institutions religieuses et qu'une nette majorité des professeurs sont prêtres ou appartiennent à des ordres religieux, comme les dominicains ou les franciscains. Une part importante des étudiants se destinent aussi à la prêtrise. Bref, les membres de l'Université sont généralement des chrétiens fervents, mais en même temps animés d'une curiosité intellectuelle indéniable et désireux de satisfaire leurs esprits par une connaissance raisonnée.

⁶Paul BENOIT, dans [72].

Le conflit potentiel entre la révélation et la raison avait déjà été envisagé par Saint-Augustin au Ve siècle. Celui-ci affichait une prudence salutaire et mettait en garde les chrétiens contre une interprétation trop littérale des Saintes Écritures en ce qui a trait au côté matériel des choses. Par exemple, la cosmologie hébraïque évoquée dans la Bible, avec sa Terre plate, est rudimentaire en comparaison de celle des Grecs. Il ne faut donc pas chercher dans les Écritures une réponse aux questions matérielles, mais seulement aux questions spirituelles, au sujet desquelles, cependant, la révélation ne peut se tromper, selon Saint-Augustin. Celui-ci préconise de fait une séparation des pouvoirs : les choses spirituelles sont du domaine de la foi et de la révélation et sont l'objet de vérités éternelles, alors que les problèmes matériels, moins importants, sont du domaine philosophique ou scientifique et peuvent admettre un progrès. Cependant, les théories philosophiques ou scientifiques ne peuvent en aucun cas entrer en contradiction avec la révélation, ce qui serait un signe certain de leur fausseté.

Lorsque le système d'Aristote fait son entrée en Europe au XIIe siècle, il séduit un grand nombre de gens instruits par sa logique imperturbable et par son caractère universel, qui veut tout englober et tout expliquer dans une structure cohérente et hiérarchique. L'univers d'Aristote est dans un état ordonné et rationnel : il y a une place pour chaque chose et chaque chose est à sa place, et pour une raison précise. La structure de cet univers semble découler de manière inéluctable et logique de principes généraux. À l'époque de la stabilisation de la féodalité et après une longue période de troubles et d'invasions, les esprits sont rassurés par un tel système et souhaitent que la foi chrétienne puisse être organisée selon un schéma comparable. Seulement, quelques points de la philosophie aristotélicienne sont en contradiction frappante avec la doctrine chrétienne et Aristote fut aussi accueilli avec méfiance par les autorités ecclésiastiques :

1. Aristote prétend que le monde est éternel, qu'il n'a jamais eu de début et qu'il n'aura pas de fin. Ceci contredit évidemment la création du monde par Dieu, à une époque d'ailleurs pas très reculée.
2. Le système d'Aristote est déterministe et semble nier la possibilité de libre arbitre aux individus. Tous les événements sont causés de proche en proche, et de manière nécessaire, par ce qui se produit dans les sphères supérieures de l'Univers. Ce point de vue enlève à Dieu même toute liberté d'action.
3. Aristote enseigne que l'âme humaine est issue d'un *intellect agent* unique situé sur la sphère de la Lune et que l'âme de chaque individu, après sa mort, retourne se fondre dans cet intellect agent, alors que la survie de l'âme individuelle est un trait fondamental de la doctrine chrétienne.

Face à ces contradictions, trois attitudes sont possibles : l'acceptation tel quel du système d'Aristote (averroïsme), son absorption dans la doctrine chrétienne, après quelques modifications (thomisme), ou finalement son rejet pur et simple (nominalisme).

L'averroïsme On peut se laisser complètement séduire par le système aristotélicien et l'accepter tel quel, en acceptant aussi que la doctrine chrétienne est contraire à la vérité sur certains points. Cette interprétation littérale d'Aristote est appelée *averroïsme*, d'après le commentateur arabo-espagnol Averroès (Ibn Rushd). SIGER DE BRABANT, professeur à Paris, était de cette catégorie. L'averroïsme fut condamné par l'Église et ses défenseurs se méritèrent des peines d'emprisonnement.

Le thomisme On peut aussi accepter partiellement le système aristotélicien, en particulier les éléments compatibles avec la doctrine chrétienne, et même tenter d'appuyer le dogme catholique sur la méthode d'Aristote. C'est la voie modérée que suivirent Albert le Grand et surtout Thomas d'Aquin.

L'Allemand ALBERT LE GRAND, dit le *Docteur Universel* (1193/1280), enseigna à Paris puis à Cologne. Il est le principal responsable de l'introduction des textes grecs et arabes à l'Université, en particulier Aristote (1240). L'Université de Paris avait auparavant interdit l'enseignement d'Aristote de 1210 à 1234. Albert le Grand était un esprit ouvert, partisan de l'observation et critiquait plusieurs points de la physique d'Aristote.⁷ Il écrit des œuvres d'histoire naturelle (*De animalibus* et *De vegetalibus*). Certains prétendent qu'il pratiqua aussi l'Alchimie.

Plus lourde de conséquences fut l'œuvre de l'Italien Thomas D'AQUIN, dit le *Docteur Angélique* (1227/1274). Moine dominicain, il fut l'élève d'Albert le Grand à Paris et enseigna lui-même à Paris et en Italie. Son œuvre majeure est la *Somme Théologique* (*Summa Theologica*), dans laquelle il expose la religion chrétienne

⁷ L'un des endroits de Paris où il enseignait, connu aujourd'hui sous le nom de *Place Maubert*, tire son nom d'une corruption de *Magnus Albert*.

en utilisant les principes de raisonnement aristotéliens. Il tenta de réconcilier la pensée d'Aristote et la religion chrétienne et mena en cela une difficile lutte contre les autres théologiens (son oeuvre fut momentanément condamnée par le décret de 1277, mais il fut canonisé en 1323). Thomas d'Aquin donne toujours préséance à la foi sur le raisonnement, mais estime que le raisonnement peut raffermir la foi. Il est l'archétype du théologien et considère la théologie comme une science :

Utrum sacra doctrina sit scientia ?

[La théologie est-elle une science ?]

... Je réponds qu'il faut dire que la théologie est une science. Mais on doit savoir qu'il y a deux genres de sciences. Les unes procèdent de principes connus par la lumière naturelle de l'intellect, comme l'arithmétique, la géométrie, etc. Les autres procèdent de principes connus à la lumière d'une science supérieure, comme l'optique procède de principes connus par la géométrie et la musique de principes connus par l'arithmétique. Et c'est de cette manière que la théologie est une science, puisqu'elle procède de principes connus par une science supérieure, à savoir la science possédée par Dieu et par les bienheureux. Ainsi, comme la musique accorde foi aux principes qui lui sont transmis par l'arithmétique, ainsi la théologie accorde foi aux principes qui lui sont révélés par Dieu.⁸.

La philosophie de Thomas d'Aquin, connue sous le nom de *thomisme*, est devenue sous le pape Léon XIII (1879) la philosophie officielle de l'Église catholique.

Le nominalisme Face aux contradictions entre la doctrine chrétienne et celle d'Aristote, on peut enfin donner préséance à la foi et accorder à Dieu une liberté absolue, en niant le déterminisme d'Aristote et en critiquant sa dialectique. En particulier, l'un des combats intellectuels engagés par les partisans de ce point de vue, appelés *nominalistes*, est la querelle des *universaux*. Les universaux sont les *idées* de Platon, c'est-à-dire les concepts abstraits dont les objets concrets ne seraient que des simulacres. L'école réaliste,⁹ inspirée de Platon, prétendait que les universaux étaient plus vrais que les objets concrets. Par exemple, la notion de "cheval" dans toute sa généralité était considérée plus "réelle" qu'un cheval véritable et particulier. Contrairement aux réalistes, les nominalistes prétendaient que les universaux n'étaient que des mots inventés par les humains et que seuls les objets concrets et particuliers étaient réels. En ce sens, les nominalistes sont les précurseurs du *positivisme*, mais il ne faut pas pousser l'analogie trop loin, car ils demeureraient avant tout des chrétiens fervents. Les nominalistes se recrutaient plus volontier parmi les ordres mendiants, comme les franciscains, plus rebelles à une société hiérarchique et matérielle. Les représentants les plus illustres de cette école nominalistes furent ROSCELLIN (1050/1122), Pierre ABÉLARD (1079/1142), Duns SCOT (ou SCOTUS) (1266/1308) et, surtout, Guillaume d'OCCAM (1285/1349). Ce dernier est surtout célèbre pour le "rasoir d'Occam" : *entia non sunt multiplicanda præter necessitatem* ("les entités ne doivent pas être multipliées au-delà du nécessaire"), ce qui signifie qu'on ne doit pas inutilement inventer des concepts, s'il est possible de représenter la réalité avec un nombre moindre de concepts : un principe d'économie qui guidera toute la science moderne. Mais ne voyons pas en Guillaume d'Occam un précurseur de la science moderne : en tant que nominaliste, il donnait liberté absolue à Dieu et de ce fait niait la rationalité du monde.

3.4.5 Roger Bacon et la méthode scientifique

Ce qui précède peut laisser croire que les intellectuels médiévaux étaient entièrement absorbés par des considérations métaphysiques et qu'ils ne s'intéressaient que très peu au monde physique pour lui-même. Ceci n'est pas tout à fait vrai.

Signalons à cet effet l'Anglais Robert GROSSETESTE (1170/1253), maître à Oxford. Il s'intéressa beaucoup aux sciences physiques, surtout à l'optique. Il lut les ouvrages d'Aristote et d'Alhazen. Il conçut la possibilité de grossir et rapprocher les objets à l'aide d'instruments optiques. Il insista sur l'importance de l'observation et de l'expérience.

C'est cependant son élève, Roger BACON (1214/1294), qui est surtout connu pour sa défense de la méthode expérimentale. Bacon enseigna à Oxford et à Paris et est considéré comme un "prophète" de la méthode

⁸Thomas d'AQUIN, *Somme théologique*

⁹Le mot réaliste peut sembler ici paradoxal.

scientifique, en particulier de la méthode expérimentale. Il fut un précurseur des scientifiques modernes en ce qu'il croyait en un Univers gouverné par des lois physiques, exprimées en langage mathématique. Selon lui, les mathématiques sont "la porte et la clef des sciences naturelles, la clef de la philosophie". Par contre, Bacon citait quatre obstacles à la connaissance :

1. Une autorité débile et incompétente.
2. De vieilles habitudes.
3. Une opinion publique ignorante.
4. La dissimulation de l'ignorance individuelle sous un étalage de sagesse apparente.

Cette analyse est encore d'actualité et démontre la clairvoyance de son auteur.

Citons le passage suivant, tiré de son *Opus Majus*, dans lequel il insiste sur l'importance de l'expérience :

Il y a deux moyens par lesquels nous acquérons la connaissances, le raisonnement et l'expérience. Le raisonnement termine la question, et nous la fait terminer aussi ; mais il ne donne pas de preuve, et n'enlève pas le doute, et ne fait pas que l'esprit se repose dans la possession consciente de la vérité, à moins que la vérité ne soit découverte par l'expérience. Par exemple, si un homme qui n'a jamais vu le feu avait à prouver par des arguments satisfaisants que le feu brûle et détruit les choses, l'esprit de l'auditeur ne serait pas satisfait, de même qu'il n'éviterait pas le feu ; jusqu'à ce que, plaçant sa main ou quelque combustible dedans, il prouve par expérience réelle ce que les arguments exprimaient ; mais quand l'expérience a été faite, son esprit est certain et repose dans la possession de la vérité, ce qui ne pouvait être donné par le raisonnement mais seulement par l'expérience. Et cela est le cas même en mathématique, où il y a les plus fortes démonstrations. Car supposons que quelqu'un ait la démonstration la plus claire à propos du triangle équilatéral sans expérience de ce triangle, son esprit ne comprendra parfaitement le problème que quand il aura effectivement devant lui les cercles intersecteurs et les lignes tirées des points de sections vers les extrémités d'un segment. Il acceptera alors les conclusions en tout satisfaction.

Voici un autre passage de l'*Opus Majus*, sur la "science expérimentale", par opposition aux autres sciences (c'est-à-dire aux autres domaines du savoir, comme la théologie ou les mathématiques) :

Cette science [expérimentale] a trois grandes prérogatives par rapport à toutes les autres sciences. La première est qu'elle vérifie ses conclusions par expérience. Car les principes des autres sciences peuvent être connus par l'expérience, mais les conclusions sont déduites des principes par voie de raisonnement. Si elles requièrent une conséquence particulière et complète de ses conclusions, l'aide de cette science peut être demandée. Il est vrai que les mathématiques possèdent une expérience utile pour leurs propres problèmes de figures et de nombre, qui s'applique à toutes les sciences et à l'expérience elle-même, car aucune science ne peut être connue sans les mathématiques. Mais si nous souhaitons une connaissance complète et parfaitement vérifiée, nous devons recourir aux méthodes de la science expérimentale.

Sur le plan des réalisations concrètes, Bacon prolongea les travaux de son maître Grosseteste en optique et entrevit la possibilité d'un instrument de grossissement à base de lentilles, mais il n'est pas prouvé qu'il en fabriqua un.

Le 7 mars 1277, l'université de Paris, qui jouissait d'une autorité suprême dans la chrétienté en matière de théologie, publia un décret lourd de conséquences. Ce décret condamnait un certain nombre d'"erreurs", dont les suivantes :

ERREUR 150 : "Qu'une personne ne se satisfasse pas de l'autorité pour avoir une certitude sur une question."

ERREUR 151 : "Qu'une personne doive se baser sur des principes connus par lui-même pour avoir une certitude sur une conclusion."

Il est clair que Bacon était visé par ce décret.¹⁰ Il fut emprisonné, peut-être de 1277 à 1292, pour "enseignement averroïste".

¹⁰Le décret comportait aussi des points plus éclairés – mais aussi peu respectueux de la liberté de pensée – comme l'interdiction de l'astrologie.

Bacon ne fut pas le seul à s'intéresser à la physique. Certains partisans de l'école nominaliste jetèrent un regard critique et éclairé sur la physique d'Aristote. Signalons le Français Jean BURIDAN (v. 1295/1366), un disciple d'Occam. Il fut recteur de l'Université de Paris, même s'il n'appartenait pas à un ordre religieux. Il est surtout connu pour la parabole de l'âne de Buridan¹¹, mais son principal mérite est sa conception du mouvement. Il écrivit des oeuvres de logique dans lesquelles il s'oppose aux explications surnaturelles des phénomènes naturels. Il est un des auteurs du concept d'*impetus*.¹¹ Rappelons qu'Aristote affirmait qu'un objet doit subir une force constante pour que sa vitesse demeure constante. Buridan opposa à cette idée l'expérience de la flèche lancée de son arc : pour qu'elle poursuive son mouvement, elle doit subir une force ; mais d'où vient cette force ? Elle ne peut venir de l'air, comme le supposait Aristote, car l'air est le milieu même qui éventuellement freine la flèche. Cet exemple est le plus clair échec de la théorie d'Aristote sur le mouvement. Buridan affirmait que la flèche continue son mouvement parce qu'elle a reçu au départ un certain "élan" (*impetus*) et qu'elle le perd petit à petit lors de sa course. Elle tombe au sol lorsque son *impetus* est épuisé. L'*impetus* est un concept proche de celui d'inertie, mais Buridan ne découvrit pas le principe d'inertie ! Il osa cependant appliquer la notion d'*impetus* aux planètes.

Signalons aussi le français Nicole ORESME (1320/1382), élève de Buridan à Paris. Il émit l'hypothèse que d'autres mondes puissent être habités (pluralité des mondes). Il affirma (correctement) que la vitesse de chute des corps est proportionnelle au temps de chute et non à la distance de chute. Il considérait l'*impetus* non pas comme une propriété des objets, mais comme une force qui accompagne l'objet et s'épuise d'elle-même. Oresme inventa aussi les coordonnées qu'on appelle cartésiennes, bien avant leur utilisation par Descartes. Oresme appliqua les mathématiques à la description du mouvement des projectiles et des planètes. Il croyait en une certaine indétermination numérique dans le mouvement des planètes, ce qui lui fournissait des arguments contre l'astrologie qui, selon lui, reposait sur une détermination rigide des mouvements planétaires. Il admit presque que la Terre tourne sur elle-même (au lieu de la sphère céleste), mais conclut :

Je cuide que le ciel est meü et la Terre non...nonobstant les raisons au contraire, car ce sont persuasions qui ne concludent pas évidemment.

¹¹ Aussi imaginé par le Byzantin Jean Philopon, plusieurs siècles auparavant. Cf. p. 2.6.



FIG. 3.3: L'Europe médiévale des universités.

Chapitre 4

La révolution scientifique

Le terme *révolution scientifique* désigne l'ensemble des progrès scientifiques réalisés aux XVI^e et XVII^e siècles. C'est à cette époque que la science occidentale prit son envol et dépassa tout ce qui avait été accompli par les Grecs ou par d'autres civilisations. Nous ferons un survol de ces découvertes non pas de manière chronologique, mais thématique, en commençant par les mathématiques, puis l'astronomie et enfin la mécanique.¹

L'une des caractéristiques principales de cette révolution scientifique est l'utilisation croissante des mathématiques en physique et la certitude, la précision que les démonstrations mathématiques apportent. C'est l'origine de l'expression *sciences exactes* pour désigner les sciences physiques et mathématiques. Une autre caractéristique est la plus grande précision des observations, surtout en astronomie. Enfin, la méthode expérimentale y sera progressivement développée, quoiqu'elle n'y atteigne pas la maturité qu'elle aura aux siècles suivants.

4.1 L'algèbre et le calcul infinitésimal

Les opérations arithmétiques Le mot arithmétique dérive du grec *arithmos* (ἀριθμός) qui veut dire *nombre* et signifie donc l'étude des nombres. Non seulement l'arithmétique s'intéresse-t-elle à la *nature* des nombres, mais aussi, plus couramment, à la pratique des opérations sur ces nombres : addition, soustraction, multiplication, division, extraction de racines, etc. L'histoire des techniques arithmétiques est longue et complexe et nous ne ferons ici que mentionner quelques repères historiques en rapport avec les méthodes qui sont encore enseignées aujourd'hui dans les écoles.²

Mêmes des opérations aussi simples que la multiplication et la division sont plutôt pénibles dans un système de numération non positionnel comme celui des Romains ou des Grecs. C'est véritablement l'introduction des chiffres indiens, avec le zéro, qui a permis de simplifier considérablement les opérations arithmétiques. L'introduction de ce système en Occident ne s'est pas faite en un jour et plusieurs personnes y ont contribué, notamment Gerbert d'Aurillac (vers l'an mil), les traducteurs d'Al Khwarizmi, et l'Italien Léonard de Pise, dit FIBONACCI (~ 1170/ ~ 1240). À l'âge de douze ans, ce dernier fut emmené par son père à Bougie (Bejaïa, en Algérie) et y apprit l'arabe et l'arithmétique dans une boutique d'épicier. Il rentre plus tard en Italie, après quelques voyages dans les pays arabes en quête de manuscrits, et publie son *Liber abaci* en 1202, dans lequel il explique le système arabe (c'est-à-dire indien) de numération, les opérations arithmétiques et d'autres connaissances nécessaires au commerce (ristournes, intérêt, monnaies et alliages, etc.). À cette époque comme aujourd'hui, l'arithmétique est une technique plus directement utile au com-

¹Les sujets abordés dans ce cours qui ne touchent pas directement l'astronomie et la mécanique ont aussi progressé pendant cette période, mais feront l'objet de rubriques séparées.

²Voir [37] ou [74] pour de plus amples détails.

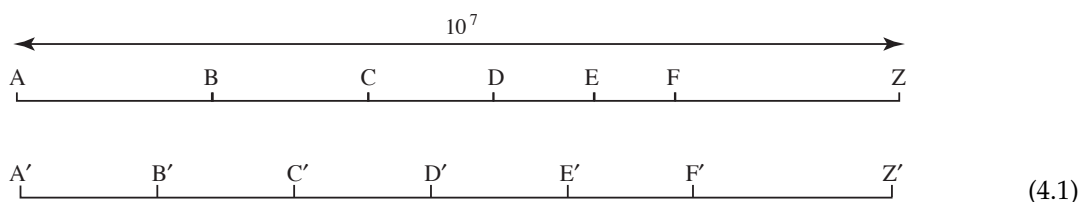
merce qu'à l'étude de la Nature. Un traité anonyme de la fin du moyen-âge, *l'Arithmétique de Trévis* (1478), nous permet de mieux connaître les techniques en usage (ou enseignées) à l'époque.

L'opération d'*addition* des nombres écrits en chiffres indiens, qui consiste à additionner séparément les unités, les dizaines, les centaines, etc., et à combiner le tout à la fin, remonte aux Indiens eux-mêmes. On en trouve trace dans un livre du mathématicien indien BHASKARA, vers 1150. L'opération de soustraction ne s'est pas standardisée aussi rapidement que celle d'addition, car plusieurs variantes existent à la fin du moyen-âge ; la technique d'"emprunter" à la colonne de gauche ce qui manque à la colonne de droite pour effectuer la soustraction date cependant du moyen-âge. La méthode de multiplication qu'on utilise aujourd'hui est à toutes fins pratiques la même que la méthode dite *de l'échiquier*, décrite dans *l'Arithmétique de Trévis*. La technique de *division* utilisée aujourd'hui s'est développée graduellement au moyen-âge, chez les Persans et les Arabes d'abord et ensuite en Occident. On la trouve dans le traité de Luca PACIOLI (1445/1514), mais elle devint la méthode standard au début du XVII^e siècle. La façon moderne de calculer la *racine carrée*, dans laquelle les chiffres d'un nombre sont séparés en groupes de deux, etc., s'est imposée au XVI^e siècle. Bref, on peut affirmer que les techniques d'opérations arithmétiques actuelles étaient à peu près adoptées à la Renaissance.

Simon Stevin Peut-être la plus remarquable contribution à l'arithmétique du XVI^e siècle est celle de l'ingénieur flamand SIMON STEVIN (1548/1620). Dans son *Arithmétique* de 1585, il propose une notation pour les fractions décimales dans laquelle la position des puissances inverses est indiquée dans un cercle. Par exemple, le nombre 5,3785 s'écrit $5\textcircled{3}\textcircled{7}\textcircled{2}\textcircled{8}\textcircled{5}$. Sept ans plus tard, l'Italien Magini voit bien que cette notation est trop lourde et qu'il suffit de séparer la position des unités de celle des dixièmes par un point ou une virgule pour que la notation soit sans ambiguïté. Cette notation sera popularisée par Napier dans ses tables de logarithmes. Stevin est aussi connu pour sa conception "unifiée" des nombres : il considérait tous les nombres réels comme aussi valables les uns que les autres, qu'ils soient entiers, négatifs, rationnels ou irrationnels. En particulier, il contribue à diffuser la notion de *nombre négatif*. Auparavant, les nombres négatifs étaient qualifiés d'"absurdes" ou de "fictifs", quoique Fibonacci avait reconnu qu'un calcul au résultat négatif signifie un déficit, un manque. En 1582, Stevin publie des tables d'intérêt, tables auparavant gardées secrètes par les financiers ! Les contributions de Stevin à la mécanique (plus précisément à la statique) sont aussi remarquables.

4.1.1 Les logarithmes

La paternité des logarithmes revient à John NAPIER of Merchiston (1550/1617), un noble écossais, dont le nom latinisé est *Neperus*. Le mot logarithme signifie "nombre du logos", *logos* (λογος) signifiant "raison" (*ratio*) ou "rapport". Il faut ici signaler que les rapports utilisés en géométrie étaient déjà conçus de manière logarithmique à l'époque. Par exemple, le rapport A/C était appelé la "somme" des rapports A/B et B/C . Napier eut l'idée d'associer à chaque nombre (ou rapport) un autre nombre (le logarithme) qui progresserait de manière arithmétique pour des rapports progressant de manière géométrique. Cette invention avait pour but de simplifier les calculs trigonométriques : Napier considérait le sinus d'un angle ϕ comme un rapport $x/10^7$, où x est un entier.



Napier construisit les logarithmes en suivant deux points qui se déplacent le long de deux droites divisées chacune en 10^7 segments (voir figure). Sur la droite du haut, le point se déplace à vitesse constante sur chaque segment, sauf que cette vitesse décroît de manière proportionnelle à la distance entre le début du segment et la fin de la droite (le point Z). Sur la droite du bas, le point se déplace à vitesse constante, une

distance de 1 étant parcourue en même temps que chaque segment de la droite du haut. L'idée est que la longueur des segments AZ, BZ, CZ, etc décroît de manière géométrique, alors que celle des segments A'B', A'C', A'D' croît de manière arithmétique. Napier veut établir la correspondance entre la distance x entre un point (disons, E) de la droite du haut et son extrémité, et la distance correspondante y entre A' et E'.

Par exemple, soit $v(\text{DE})$ la vitesse à laquelle le segment DE est parcouru. Cette vitesse est proportionnelle à la distance DZ; on peut donc écrire $v(\text{DE}) = k\overline{\text{DZ}}$. Si t est le temps qui s'écoule entre chaque segment (toujours le même), on a

$$\overline{\text{DZ}} = \overline{\text{CZ}} - \overline{\text{CD}} = \overline{\text{CZ}} - tk\overline{\text{CZ}} = (1 - kt)\overline{\text{CZ}} \quad (4.2)$$

et donc

$$\overline{\text{DZ}} = (1 - kt)\overline{\text{CZ}} = (1 - kt)^2\overline{\text{BZ}} = (1 - kt)^3\overline{\text{AZ}} \quad (4.3)$$

ce qui démontre que x décroît de manière géométrique alors que y augmente de manière arithmétique. Napier choisit la valeur $kt = 10^{-7}$, donc la longueur Δx d'un segment donné est

$$\Delta x = -ktx\Delta y = -\frac{x}{10^7}\Delta y \quad (4.4)$$

où $\Delta y = 1$ de toute manière. En appliquant cette relation de proportionnalité à des variations infinitésimales de x , on trouverait

$$dx = -\frac{x}{10^7}dy \text{ alors que } x = 10^7 \text{ si } y = 0 \quad (4.5)$$

ce qui donne, en langage moderne,

$$y = -10^7 \ln(10^{-7}x) \quad (4.6)$$

où la notation moderne \ln désigne le *logarithme népérien*. Ainsi, à l'aide de tables, le calcul des produits est réduit à celui de sommes et celui de l'extraction de racines est réduit à celui de multiplications et divisions.

C'est Henry BRIGGS (1561/1631), collaborateur de Napier, qui eut l'idée d'utiliser la base 10 pour les logarithmes (*logarithmes vulgaires*) et il construisit une table des logarithmes de 1 à 20 000 et de 90 000 à 100 000 à 14 décimales, un travail colossal ! (le flamand Adriaan Vlacq complétera la table avec les nombres compris entre 20 000 et 90 000 en 1628). Pour ce faire, il procéda à 54 extractions successives de racines carrées à partir de 10, c'est-à-dire qu'il calcula $10^{1/2}$, $10^{1/4}$, $10^{1/8}$, etc. jusqu'à $10^{(1/2)^{54}}$. Il posa ensuite que

$$\log_{10}(10^{(1/2)^{54}}) = \left(\frac{1}{2}\right)^{54} \quad (4.7)$$

Il construisit ensuite la table de logarithmes à partir de ces racines en se servant des règles

$$\log_{10}(AB) = \log_{10}A + \log_{10}B \text{ et } \log_{10}(A^n) = n\log_{10}A \quad (4.8)$$

Les logarithmes ont été un outil de calcul extrêmement répandu jusqu'à l'invention des calculateurs électroniques portatifs, autour de 1970.³ La règle à calculer est basée entièrement sur les logarithmes.

4.1.2 La notation algébrique

Les progrès de l'algèbre dépendent beaucoup d'une notation pratique. La notation algébrique telle que nous l'utilisons aujourd'hui a été fixée au début du XVIIe siècle et se trouve achevée chez Descartes. Avant la Renaissance, les problèmes algébriques étaient posés en langage courant (ce qu'on appelle l'algèbre *rhétorique*) : aucune notation spéciale n'était utilisée et donc les règles de l'algèbre, ne pouvant opérer par écrit, ne

³Les premiers ordinateurs électroniques datent de la deuxième guerre mondiale (1939/1945) et ont été précédés (de peu) par des calculateurs mécaniques, qui ne pouvaient effectuer que des opérations élémentaires.

procédaient que par étapes simples dans l'esprit des calculateurs. Les premiers occidentaux à introduire des notations particulières pour les opérations algébriques furent allemands : Johann WIDMANN introduit les signes $+$ et $-$ dans un ouvrage publié à Leipzig en 1489, encore qu'il s'agisse plus de symboles marquant un bilan (nombres négatifs et positifs) que des opérations entre nombres. Christoph RUDOLFF (1525) introduit une notation proche de la nôtre pour les racines carrées. C'est Michael STIFEL (v. 1487/1567) qui introduit la notation moderne des racines : $\sqrt[n]{}$, $\sqrt[n]{}$, etc. Il désigne l'inconnue d'une équation par A et ses puissances par une répétition : AA pour A^2 , AAA pour A^3 , etc. Il arrive souvent que l'inconnue dans une équation ne soit pas indiquée, mais sous-entendue, comme chez Simon STEVIN (1548/1620) ou Rafaël BOMBELLI (cf. Fig. 4.1)

$$\begin{array}{l} 1^{(0)} + 3^{(1)} + 6^{(2)} + ^{(3)} \quad (\text{Stevin}) \\ 1 . p . \overset{1}{3} . p . \overset{2}{6} . p . \overset{3}{1} \quad (\text{Bombelli}) \end{array}$$

FIG. 4.1: L'expression $1 + 3x + 6x^2 + x^3$ dans les notations de Stevin et de Bombelli.

C'est François VIÈTE (1540/1603) qui contribua le plus à l'avancement de la notation algébrique, en considérant la représentation littérale d'expressions algébriques comme des entités sur lesquelles on peut effectuer des opérations (manipulation de symboles). Il appella cette technique "logistique spécieuse" (*logistica speciosa*). Il utilise les voyelles (A, E, O, \dots) pour désigner les inconnues et les consonnes (B, C, \dots) pour désigner les paramètres.

Dans la *Géométrie* de Descartes (1637), les inconnues ou variables sont désignées par les dernières lettres de l'alphabet (x, y, z), les paramètres par les premières (a, b, c, \dots) et les puissances sont portées en exposant : x^2, y^3, \dots

4.1.3 Les équations algébriques

La résolution d'équations algébriques, en particulier la recherche des racines des polynômes, est un problème qui a longtemps occupé les mathématiciens, initialement en raison de son importance pratique et ensuite, avouons-le, pour le simple plaisir de la chose ! L'équation linéaire $ax + b = 0$ a été résolue dès la plus haute antiquité. L'équation quadratique $ax^2 + bx + c = 0$ a été résolue de manière générale par Al-Khwarizmi, qui indiqua les conditions d'existence de racines réelles ($b^2 - 4ac > 0$).

La résolution de l'équation du troisième degré

$$z^3 + az^2 + bz + c = 0 \quad (4.9)$$

n'est pas aussi simple. De grands mathématiciens arabes y travaillèrent, notamment Omar Al-Khayyam et aussi Al-Kashi, qui utilisa des méthodes d'approximation numérique. Ce sont les algébristes italiens du XVI^e siècle qui en trouvèrent la solution générale.

Les mathématiciens de cette époque participaient régulièrement à des concours d'habileté au cours desquels des défis et des problèmes étaient lancés. Le vainqueur empochait le dépôt de son rival, d'où l'importance du secret. Signalons d'abord Scipione DEL FERRO (1456/1526), qui connaissait la solution à l'équation du type $x^3 + ax = b$, mais qui la garda secrète. Ensuite, Nicollo Fontana de Brescia, dit TARTAGLIA (1499/1557), trouva les solutions aux équations $x^3 + mx^2 = n$ et $x^3 + ax = b$, juste avant un concours l'opposant à un élève de del Ferro (il gagna le concours). Jérôme CARDAN (Gerolamo Cardano, 1501/1576) acheta la solution à Tartaglia sous promesse de ne pas la dévoiler. Il fit des découvertes supplémentaires et romput sa promesse en publiant la solution dans son ouvrage *Ars magna de regulis algebraicis* (le grand art des règles de l'algèbre), paru en 1545.

La solution de Cardan Expliquons la solution de Cardan. Premièrement, Cardan montre qu'on peut ramener la forme générale de l'équation cubique à la forme restreinte $x^3 + mx = n$, en procédant à un changement de variable approprié (une translation). Ensuite, il définit deux autres paramètres (t et u) tels que $t - u = n$ et $tu = (m/3)^3$. Ensuite, il montre par des considérations géométriques que la solution est $x = \sqrt[3]{t} - \sqrt[3]{u}$. Pour nous, il suffit de vérifier que

$$\left(\sqrt[3]{t} - \sqrt[3]{u}\right)^3 = t - u - 3\left(\sqrt[3]{t} - \sqrt[3]{u}\right)\sqrt[3]{tu} \quad (4.10)$$

ce qui se fait facilement en développant. Il suffit ensuite d'exprimer t et u en fonction des coefficients originaux m et n , ce qui s'effectue par résolution d'une équation du second degré :

$$t = \frac{n}{2} + \sqrt{\left(\frac{n}{2}\right)^2 + \left(\frac{m}{3}\right)^3} \quad u = -\frac{n}{2} + \sqrt{\left(\frac{n}{2}\right)^2 + \left(\frac{m}{3}\right)^3} \quad (4.11)$$

Notons que Cardan impose la restriction inutile que les coefficients de son équation (m et n) sont positifs, ainsi que ceux de l'équation quadratique à laquelle il aboutit. Remarquons que si $(n/2)^2 + (m/3)^3$ est négatif (cas exclu par Cardan), l'équation quadratique n'a pas de racines réelles, alors que l'équation cubique en a nécessairement une. En fait, si l'équation cubique possède trois racines réelles, alors t et u sont nécessairement complexes. Cardan obtient aussi des racines négatives, qu'il appelle "racines moins pures". Enfin, il précise comment résoudre l'équation du quatrième degré, en s'aidant d'une équation du troisième degré, de la même manière qu'il s'aide d'une équation de deuxième degré pour résoudre l'équation du troisième degré.

Après Cardan, Rafaël BOMBELLI (1526/1572) publie un traité d'algèbre vers 1560, dans lequel il explique les solutions trouvées par ses prédécesseurs et dans lequel il incorpore la majorité des exercices du livre de Diophante d'Alexandrie (sans citer leur auteur). Il est le premier à introduire ce qui deviendra les *nombre imaginaires*. En fait, il considère i et $-i$ (*meno di piu* et *meno di meno*), affirme que $-i \cdot i = 1$ et que i et 1 ne s'additionnent pas (indépendance linéaire des imaginaires et des réels).

Les nombres complexes La notion de nombre imaginaire se précisa en 1746 quand Jean le Rond D'ALEMBERT (1717/1783) démontra qu'il n'y a qu'un seul type de nombres imaginaires, c'est-à-dire que tout nombre, provenant par exemple de la résolution d'une équation, peut se mettre sous la forme $a + ib$. La notation i pour $\sqrt{-1}$ fut introduite par Leonhard EULER (1707/1783) en 1777. On lui doit aussi la formule dite d'Euler, qu'il publia en 1748 :

$$e^{ix} = \cos x + i \sin x \quad (4.12)$$

4.1.4 La géométrie analytique

Le développement de l'algèbre, en particulier la possibilité d'effectuer des calculs à partir des seules équations, a permis d'affranchir l'algèbre de la géométrie : les quantités (paramètres et inconnues) figurant dans une équation ne représentent pas nécessairement des longueurs ou des surfaces.

En revanche, ces mêmes développements ont permis de formuler la géométrie en fonction de l'algèbre : c'est la *géométrie analytique*, qu'on attribue principalement à René DESCARTES (1596/ 1650), qui la publia dans sa *Géométrie* de 1637, et à Pierre de FERMAT (1601/1665), qui l'utilisa dès 1629, malheureusement sans publier ses découvertes. L'idée essentielle est l'introduction de coordonnées (x, y) pour spécifier la position d'un point, ce qui permet de représenter une courbe par une équation algébrique reliant les coordonnées x et y . Notons qu'on distingue à l'époque les courbes *algébriques*, qui sont les lieux géométriques dans le plan d'une équation algébrique $P(x, y) = 0$ (P étant une expression polynomiale) des courbes *mécaniques* ou transcendentes, qui, au contraire, ne peuvent être obtenues que par des procédés mécaniques (par exemple des roulements) et qui impliquent des expressions non polynomiales (et donc trigonométriques, logarithmiques, etc.).

La *Géométrie* de Descartes aura une influence énorme sur le siècle et sera maintes fois rééditée avec commentaires. Notons cependant que les axes cartésiens perpendiculaires n'apparaissent pas explicitement dans la

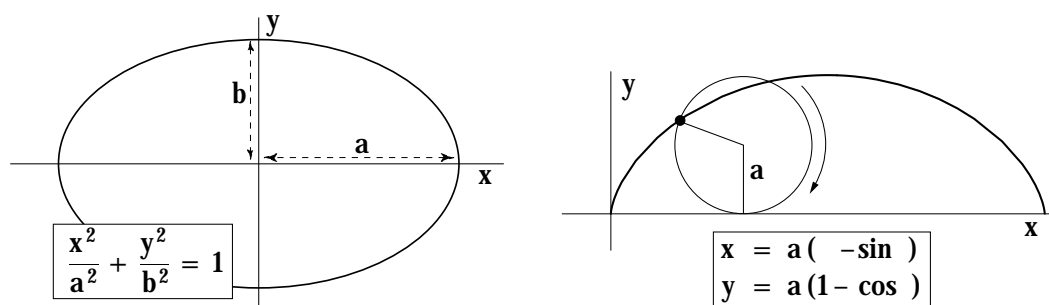


FIG. 4.2 : Exemples de courbes algébrique et mécanique. L'ellipse (à gauche) est une courbe algébrique car elle est déterminée par une relation polynomiale entre x et y . La cycloïde (à droite) est une courbe mécanique. Elle est décrite par un point situé sur la circonférence d'un disque qui roule sans glisser sur l'axe des x . Elle peut être décrite par des équations paramétriques, c'est-à-dire que x et y sont exprimés en fonction d'une variable indépendante ξ , mais la courbe ne peut être décrite par une relation simple entre x et y seulement.

Géométrie et que Descartes utilise, comme variables x et y , des longueurs de segments non perpendiculaires. L'emploi des axes perpendiculaires s'imposera de lui-même à la génération qui suivra Descartes.

L'invention de la géométrie analytique est un point tournant des mathématiques et de la science en général. Avant Descartes, la géométrie dominait les mathématiques. Depuis que la géométrie analytique s'est imposée au XVII^e siècle, c'est l'inverse : l'algèbre (ou l'analyse, pour employer le mot proposé par Viète) domine, la géométrie lui étant en quelque sorte subordonnée. Les calculs algébriques étant plus simples et flexibles que les constructions géométriques, la puissance des mathématiques s'en est accrue. La géométrie analytique a rendu possible le calcul infinitésimal et a donné à la science moderne naissante les outils quantitatifs nécessaire à son développement et son affirmation. L'astronomie et la mécanique sont en grande partie des sciences géométriques : les trajectoires des objets célestes, leurs mouvements de rotations intrinsèques, sont des objets géométriques. La géométrie analytique a permis de les transformer en objets algébriques, qu'on peut traiter par les techniques du calcul différentiel et intégral.

4.1.5 Analyse combinatoire et probabilités

La notion de probabilité n'a pas été rigoureusement définie au XVII^e siècle. Cependant, on y fit d'importants travaux sur l'analyse combinatoire appliquée aux jeux de hasard. C'est Fermat qui fit le plus en ce domaine ; on lui doit la formule pour le nombre de combinaisons de p éléments pris dans un ensemble de n éléments :

$$C_n^p = \frac{n!}{p!(n-p)!} \quad (4.13)$$

Pascal (en correspondance avec Fermat) et Huygens firent aussi des travaux en ce sens. Une véritable théorie des probabilités dut attendre les travaux de Pierre Simon de LAPLACE, en 1774, et ceux du Russe KOLMOGOROV dans les années 1930 (pour l'axiomatisation).

4.1.6 Le calcul infinitésimal

Le *calcul différentiel et intégral*, ou *calcul infinitésimal*, est l'aboutissement mathématique de la révolution scientifique. Son invention est attribuée indépendamment à Isaac NEWTON (1642/1727) et à Wilhelm Gottfried LEIBNIZ (1646/1716). Cependant, leurs travaux reposent en grande partie sur les travaux de leurs prédécesseurs et il est injuste de leur attribuer la paternité exclusive de cette invention.

Eudoxe et, surtout, Archimède sont en fait les précurseurs de la méthode d'intégration. Les travaux de ce dernier, bien connus en Occident au début du XVII^e siècle, ont inspiré des efforts similaires. Johannes KE-

PLER (1571/1630), voulant connaître le volume approximatif d'un de ses tonneaux,⁴ entreprit de le découper (au sens imagé) en tranches fines et de sommer les volumes de chacune des tranches. C'est l'idée de base du calcul intégral, qu'Archimède connaissait déjà. L'Italien Bonaventura CAVALIERI (1598/1647) considéra que l'aire sous une courbe s'obtient en balayant une droite sous cette courbe, c'est-à-dire en "sommant" un nombre infini de droites, concept qui manque manifestement de rigueur mathématique. Gilles Personne de ROBERVAL (1602/1675) perfectionna la méthode de Cavalieri (dite *méthode des indivisibles*), calcula divers volumes de révolution et démontra, en langage moderne, que

$$\int_0^1 x^m dx = \frac{1}{m+1} \quad (4.14)$$

pour m entier. Ce résultat fut généralisé à un m fractionnaire par Fermat.

Parallèlement au problème de la somme de quantités infinitésimales se posa le problème des *tangentes*, c'est-à-dire le calcul des pentes des tangentes à certaines courbes. C'est Fermat qui fit le plus progresser cette question initialement : par exemple, il savait que la tangente à la parabole $y = x^2$ est égale à $2x$ (la dérivée de x^2 , en langage moderne). Il savait aussi comment trouver les maximums et minimums d'une courbe en demandant que la tangente (c.-à-d. la pente) soit nulle : En langage moderne, pour trouver l'extremum d'une fonction $f(x)$, il procède de la manière suivante : (i) il pose $f(x + \varepsilon) = f(x)$, ε étant une quantité aussi petite que l'on veut ; (ii) il simplifie l'équation ; (iii) il divise par ε et (iv) il pose $\varepsilon = 0$. Par exemple, pour la fonction quadratique générale $f(x) = ax^2 + bx + c$, il pose $a(x + \varepsilon)^2 + b(x + \varepsilon) + c = ax^2 + bx + c$, ce qui se simplifie en $2ax\varepsilon + a\varepsilon^2 + b\varepsilon = 0$. En divisant par ε , on trouve $2ax + a\varepsilon + b = 0$. En posant $\varepsilon = 0$, on trouve $2ax + b = 0$, ou encore $x = -b/2a$, qui est la position de l'extremum. On reconnaît ici la procédure utilisée pour calculer une dérivée, dans le cas particulier où cette dérivée est nulle.

Le problème le plus subtil traité à l'aide des ces méthodes précédant les travaux de Newton et Leibniz est celui de la courbe *isochrone*, résolu par Christian HUYGENS (1629/1695). Huygens a longtemps travaillé sur la fabrication de pendules (tâche éminemment pratique) et s'est aperçu que la période d'un pendule n'est plus indépendante de l'amplitude quand celle-ci est trop grande. Il pensa à un mécanisme pour raccourcir la longueur du pendule de manière automatique lorsque l'angle augmente. La courbe isochrone est le lieu géométrique parcouru par l'extrémité du pendule lorsque sa période est indépendante de son amplitude. Pour Huygens, la résolution de ce problème demandait le calcul de l'intégrale suivante :

$$\int_0^h \frac{du}{\sqrt{u(h-u)}}, \quad (4.15)$$

qu'il calcula à l'aide des méthodes de Roberval. Il se trouve que la courbe en question est une cycloïde.

La notion de *série* a aussi été développée à cette époque, surtout par John WALLIS (1616/1703) et James GREGORY (1638/1675).

Leibniz La somme de ces travaux permit à Leibniz, en visite à Paris chez Huygens, de développer le calcul différentiel et intégral que nous connaissons, avec les notations suivantes :

$$\frac{dy}{dx}, \quad \frac{d^2y}{dx^2}, \quad \int \dots dx, \text{ etc.} \quad (4.16)$$

Leibniz conçut tout cela vers 1675 et le publia en 1684 et en 1686. Leibniz s'aperçut que le problème des intégrales est en fait identique au problème des *primitives*, c'est-à-dire des dérivées inverses. Il suffit dès lors d'établir une table des dérivées et de retrouver les intégrales (intégrales indéfinies) dans cette table. Le calcul différentiel et intégral s'affranchit progressivement de son interprétation géométrique et fut développé plus avant par les membres de la famille BERNOULLI (Jean, Jacques et Daniel).

Les fluxions de Newton Parallèlement à Leibniz et tout à fait indépendamment, Newton développa sa propre version du calcul différentiel et intégral vers 1665, mais ne la publia que beaucoup plus tard. Newton

⁴Il se monta une cave à vin après son second mariage !

avait une vision de la dérivée basée sur le mouvement et appelait son invention *calcul des fluxions*. Il utilise la notation \dot{y} pour la *fluxion* de y (c'est-à-dire sa dérivée), \ddot{y} pour la deuxième dérivée et $[y]$ pour la *fluente*, c'est-à-dire la primitive de y . Il démontre, comme Leibniz, la règle permettant de calculer la dérivée d'un produit de fonctions : $(yz)' = y'z + yz'$. Il définit l'intégrale par la méthode des parallélogrammes inscrits sous la courbe et possède une notion intuitive du concept de *limite*.

On peut affirmer que le travail de Newton est plus rigoureux que celui de Leibniz, mais que la notation de ce dernier est supérieure à celle de Newton, surtout quand vient le temps d'étudier les équations différentielles. Une violente querelle de priorité opposa Newton à Leibniz et, par extension, l'Angleterre au Continent. Les Anglais refusèrent obstinément d'utiliser la notation de Leibniz pendant tout le XVIII^e siècle, ce qui eut un effet plutôt désastreux sur les progrès du calcul infinitésimal chez eux : les plus grandes découvertes en la matière eurent lieu sur le Continent. Le plus grand traité de calcul infinitésimal paru au XVIII^e siècle est celui d'Euler, *Introductio in analysin infinitorum*, dans lequel il introduit la notion de *fonction*. C'est seulement vers 1821–1823 que le Français Augustin CAUCHY (1789/1857) introduit formellement les notions de limite et de continuité.

4.2 La révolution copernicienne

On considère généralement la publication des idées de Copernic, en 1543, comme un point tournant dans l'histoire des sciences. En fait, ce qu'on appelle la révolution copernicienne ne se fit pas en un jour et le système de Copernic, pris à part, n'aurait peut-être pas eu la vie longue s'il n'avait été suivi d'une autre révolution, plus profonde celle-là : l'invention de la mécanique. Dans cette section, nous décrirons sommairement les travaux purement astronomiques de quatre grandes figures de cette époque : Copernic, Tycho Brahé, Kepler et Galilée.

4.2.1 Copernic

Nicolas COPERNIC (1473/1543) vécut la majeure partie de sa vie en Pologne (son pays natal), bien qu'il étudia un temps en Italie (Padoue, Ferrare). Il bénéficia de l'appui de son oncle évêque pour devenir chanoine⁵ et, de par cette fonction, reçut une rente à vie et disposa de suffisamment de temps à consacrer à ses recherches astronomiques.⁶ Copernic se construisit un petit observatoire à l'aide duquel il mesura les positions des planètes et s'aperçut que la théorie des Ptolémée, décrite dans l'*Almageste*, ne donnait pas des résultats suffisamment précis. Il entreprit alors de construire son propre système du monde. Sa théorie fut publiée l'année de sa mort (on raconte qu'il reçut un exemplaire de son livre imprimé sur son lit de mort), avec le titre : *De revolutionibus orbium coelestium libri sex* (Des révolutions des orbes célestes, en six livres). Copernic écrivit aussi, vers 1512, un court essai expliquant une version moins développée de sa théorie. Notons qu'à l'époque de Copernic, l'invention de l'imprimerie avait rendu les livres anciens accessibles comme jamais auparavant : l'*Almageste* a connu sa première impression en 1515 et les *Éléments* d'Euclide en 1482. Ainsi, un savant solitaire des confins de l'Europe pouvait étudier ces oeuvres dans le détail, ce qui aurait été plus difficile un siècle auparavant.

Le système de Copernic et ses avantages Copernic affirme que la Terre est une planète comme les autres, qu'elle tourne autour du Soleil et sur elle-même. Les cercles des planètes autour du Soleil sont, dans l'ordre, ceux de Mercure, Vénus, la Terre, Mars, Jupiter et Saturne. Le Soleil est le centre de l'Univers. Le système de Copernic, dans sa forme simple énoncée ici, présente les avantages suivants par rapport au système de Ptolémée :

1. Le mouvement rétrograde des planètes s'explique naturellement, à la fois pour les planètes intérieures (Mercure et Vénus) et les planètes extérieures.

⁵ Un chanoine est par définition membre du *chapitre* (conseil) d'un évêché.

⁶Pour une biographie de Copernic, cf KOESTLER.



FIG. 4.3: Nicolas COPERNIC (1473/1543)

2. L'amplitude des rétrogradations des planètes est de plus en plus petite lorsqu'on passe de Mars à Jupiter et à Saturne. Ceci s'explique naturellement dans un schéma héliocentrique, car cette amplitude est reliée au rapport du rayon de l'orbite de la planète à celui de l'orbite terrestre.
3. Le fait que Mercure et Vénus ne s'éloignent jamais du Soleil reçoit une explication naturelle. Plus généralement, les coïncidences propres au système géocentrique décrites en p. 2.5.2 sont expliquées de manière naturelle.
4. Les distances entre le Soleil et les planètes peuvent être calculées à partir des observations (en fonction de la distance Terre-Soleil). Voir la figure 4.5, par exemple. Dans le système de Ptolémée, les distances absolues n'ont aucune importance réelle : seul le rapport entre le rayon de l'épicycle et celui du déferent compte.
5. Les périodes orbitales croissent de manière uniforme quand on passe de l'orbite la plus petite (Mercure) à la plus grande (Saturne) et les étoiles fixes sont immobiles. Ceci semble naturel à Copernic, car plus l'orbite est longue à parcourir, plus la période doit être longue.

Cependant, la théorie de Copernic est plus compliquée que ce qui vient d'être énoncé ; en fait, elle se doit de l'être, si elle veut surpasser celle de Ptolémée en précision. L'une des motivations principales de Copernic était de restaurer la perfection du mouvement circulaire uniforme, absente du système de Ptolémée du fait de l'utilisation de l'équant par celui-ci. Copernic reste fidèle à la physique d'Aristote pour l'essentiel : les objets célestes doivent suivre des orbites circulaires car ce sont des corps "parfaits". Ce refus de Copernic de faire appel à l'équant le force à introduire de nombreux épicycles supplémentaires. En particulier, ce n'est pas exactement le soleil qui est le centre de l'Univers, mais le "soleil moyen", le véritable soleil étant excentrique. Tel que décrit dans *De revolutionibus*, le système de Copernic est peut-être plus précis que celui de Ptolémée, mais compte légèrement plus d'épicycles que celui-ci!⁷ La plus grande précision du système de Copernic permit à E. Reinhold, en 1551, de publier les *tables pruteniques*, éphémérides qui détrônèrent les anciennes *tables alphonsines* basées sur l'Almageste.

Inconvénients du système de Copernic

1. Le système de Copernic souffre d'une certaine imprécision liée au choix paradoxal de Copernic de faire passer les plans orbitaux des planètes par le centre de la terre et non par le centre du soleil, un vestige de la théorie géocentrique. Kepler corrigera cette anomalie.
2. Si la Terre tourne et que les étoiles fixes ne sont pas très éloignées (ce qu'on croyait à l'époque), alors on devrait être capable d'observer un effet de parallaxe des étoiles fixes en fonction des saisons. Autrement dit, les constellations devraient apparaître déformées en hiver par rapport à leur forme en été, car la distance entre la Terre et les étoiles n'est pas la même alors. Ce parallaxe n'étant pas observé (il ne le sera qu'au XIXe siècle), Copernic est réduit à supposer (correctement) que les étoiles fixes sont extrêmement éloignées : il augmente d'un facteur 2000 le rayon de la sphère des fixes. Ceci semble artificiel au XVIe siècle, comme au temps d'Aristarque

⁷Cf. [40] sur ce point.

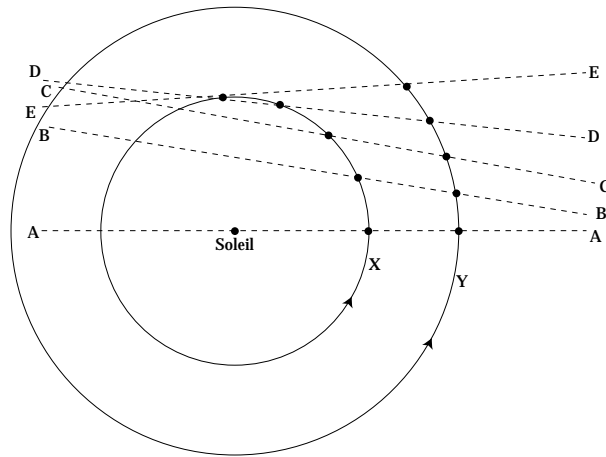


FIG. 4.4 : Schéma démontrant comment le système de Copernic explique facilement le mouvement rétrograde des planètes. La planète intérieure (X) se déplace plus rapidement que la planète extérieure (Y). Les deux planètes effectuent leur rotation autour du Soleil dans le même sens (le sens antihoraire). Cependant, vu de X, le mouvement de Y sur le fond des étoiles fixes apparaît rétrograde entre A et C et direct entre C et E. Inversement, vu de Y, le mouvement de X apparaît direct entre A et C et rétrograde entre C et E.

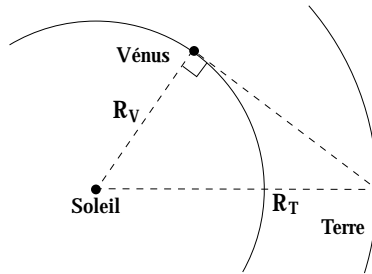


FIG. 4.5 : Schéma démontrant comment la distance entre le Soleil et Vénus (R_V peut être déterminée en fonction de la distance Terre-Soleil (R_T). L'angle maximal α que fait Vénus avec le Soleil est mesuré et ensuite $R_V = R_T \sin \alpha$.

TAB. 4.1 : Paramètres du système solaire dans la théorie de Copernic et valeurs modernes correspondantes. Note : la période *synodique* d'une planète est l'intervalle séparant deux conjonctions de cette planète avec la Terre. La période *sidérale* est le temps que prend une planète pour effectuer une rotation complète autour du Soleil.

Planète	Période synodique moyenne		Période sidérale		Distance moyenne au Soleil (u.a.)	
	Copernic	valeur actuelle	Copernic	valeur actuelle	Copernic	valeur actuelle
Mercure	116 j.	116 j.	88 j.	87,91 j.	0,36	0,391
Vénus	584 j.	584 j.	225 j.	225,00 j.	0,72	0,721
Terre			365,25 j.	365,26 j.	1	1
Mars	780 j.	780 j.	687 j.	686,98 j.	1,5	1,52
Jupiter	399 j.	399 j.	12 ans	11,86 ans	5	5,2
Saturne	378 j.	378 j.	30 ans	29,51 ans	9	9,5

3. La physique d'Aristote ne peut expliquer pourquoi la Terre tourne autour du Soleil, car dans cette physique, tout objet tend naturellement vers la position indiquée par sa composition en air, feu, eau et terre (les quatre éléments). En fait, la Terre doit être immobile dans cette physique et ne peut même pas tourner sur elle-même. Copernic doit augmenter la physique d'Aristote d'un principe bizarre affirmant que le mouvement naturel d'un objet sphérique est de tourner sur lui-même et autour du Soleil, ce que fait la Terre. Cependant, les objets terrestres doivent toujours tomber naturellement vers le centre de la Terre, même si celle-ci est en mouvement !
4. Si le mouvement naturel des planètes (et des objets célestes) est de tourner en cercle autour du Soleil, pourquoi la Lune tourne-t-elle autour de la Terre ? Copernic n'apporte aucune réponse. A posteriori, la lacune essentielle du système de Copernic, comme de tous ceux qui le précèdent, est qu'il n'explique pas *pourquoi* les astres tournent ; il ne fait que décrire leur mouvement de la manière qui lui semble la plus simple possible. Il faudra attendre Newton pour dénouer l'impasse des systèmes du monde.

Réactions au système de Copernic Ces raisons firent que la théorie de Copernic ne reçut pas un accueil universellement favorable. D'un point de vue plus général, il est difficile pour les gens instruits du XVI^e siècle d'admettre que la Terre soit une planète parmi d'autres. Les planètes ne sont-elles pas que de grosses étoiles errantes ? Enlever sa position centrale à la Terre enlève sa position centrale à l'espèce humaine. Dans un univers copernicien, rien n'empêche à priori que d'autres planètes soient habitées ! Ces habitants sont-ils partie de l'alliance que Dieu a conclu avec les hommes ? Les conséquences religieuses d'une telle affirmation peuvent être sérieuses. C'est pourquoi l'Allemand Andreas OSIANDER, qui supervisa la publication du livre de Copernic, écrivit, sans demander l'avis de l'auteur, une préface précautionneuse, non signée, dans laquelle il affirmait que ce système ne devait pas être considéré comme une description de la réalité, mais simplement comme un outil de calcul permettant de retracer la position des planètes avec plus de précision. Cette affirmation a été reprise quatre siècles plus tard à propos de la mécanique quantique et peut servir de point de départ à une longue discussion sur la nature des théories scientifiques. Elle dénote une attitude *positiviste* face à la science. Tout porte à croire que Copernic ne partageait pas cette vision. Il est cependant intéressant de citer ce que Thomas d'Aquin affirmait trois siècles plus tôt sur le système de Ptolémée, affirmation étonamment prophétique :

Bien que ces hypothèses [celles de Ptolémée] paraissent sauver les apparences, il ne faut pas affirmer qu'elles sont vraies, car on pourrait peut-être expliquer les mouvement apparents des astres par quelque autre procédé que les hommes n'ont point encore conçu.

La réaction la plus négative à la théorie de Copernic vint de Martin Luther, qui la condamna parce qu'elle contredit la Sainte Écriture. Il aurait affirmé ceci à ses convives lors d'un dîner :

Celui qui veut être intelligent ne doit pas se satisfaire de l'opinion des autres. Il doit toujours avancer quelque chose de son cru, comme le fait celui-là [Copernic] qui veut renverser toute l'astrologie. Mais quoique l'astrologie ait été bouleversée, je crois, quant à moi, à l'Écriture Sainte, car Josué a commandé au soleil et non à la terre, de s'arrêter.⁸

En effet, dans un passage de l'Ancien testament, Josué obtient de Yahvé qu'il arrête temporairement la course du Soleil autour de la Terre, afin de lui permettre de poursuivre le massacre qu'il inflige à ses ennemis ! En général, les catholiques ont une interprétation moins littérale de la Bible qui leur permet de contourner cette difficulté, ce qui fait qu'initialement, la théorie de Copernic ne fut pas défavorablement reçue dans les pays catholiques, pour des raisons religieuses du moins. Cet état de chose changea en raison de l'attitude d'un ex-dominicain exalté, Giordano BRUNO (1548/1600), qui adopta la théorie de Copernic et la dépassa en affirmant la pluralité des mondes habités et le caractère infini de l'Univers. De plus, Bruno professait des idées religieuses tout à fait étrangères à l'Église catholique : une forme de panthéisme dans laquelle Dieu est assimilé à l'Univers. Bruno fut jugé par l'Inquisition et brûlé comme hérétique en 1600. Dès lors, l'Église se méfia des coperniciens, qu'elle associait à l'hérésie de Bruno. C'est pour cette raison que, plus tard, Galilée eut maille à partir avec l'Inquisition. Il reste que Copernic eut des adversaires et des partisans à la fois chez les catholiques et les protestants.

⁸Cité dans [85]

4.2.2 Tycho Brahé

L'astronome danois Tycho BRAHÉ (1546/1601) est l'une des figures les plus pittoresques de l'histoire de l'astronomie.⁹ La contribution essentielle de Tycho est l'utilisation d'instruments de mesures très précis dans l'observation des planètes, observations qui permirent à Kepler d'énoncer ses trois lois.

Tycho avait reçu du roi du Danemark la souveraineté de l'île de Hveen pour y construire un observatoire qu'il appela *Uraniborg* (la ville des cieux). Tycho y fabriqua des appareils de mesure (quadrants et sextants) beaucoup plus précis que tout ce qui avait été fait auparavant : ses instruments en métal – toujours destinés à guider l'oeil nu puisque la lunette ne fera son apparition en astronomie qu'avec Galilée – avaient plusieurs mètres de long. Il pouvait mesurer un angle avec une précision de 10 secondes d'arc, alors que Copernic estimait quelques années auparavant qu'il était vain d'espérer une précision aussi bonne que 10 minutes d'arc ! Il fallut un siècle avant que des mesures plus précises puissent être effectuées, à l'aide de lunettes relativement puissantes. Certains de ses instruments étaient abrités dans des chambres souterraines afin de les protéger des vents et de la pluie. Le but de Tycho était de construire des tables astronomiques (éphémérides) fiables, car il savait bien que celles dont il disposait auparavant (calculées d'après Ptolémée) ne l'étaient pas assez. Tycho procéda à des observations systématiques pendant environ vingt ans, d'une nuit à l'autre, continuité au moins aussi importante que la précision de ses mesures. On peut dire que Tycho est le pionnier de la précision des mesures.

On doit à Tycho des observations importantes qui ont fait voler en éclats les conceptions de l'époque sur les "sphères célestes". En 1572, il observa systématiquement une *nova*, c'est-à-dire une étoile nouvelle qui apparut soudainement, surpassa en éclat Vénus même (l'astre le plus brillant du ciel après le Soleil et la Lune) et disparut progressivement en 1574. On sait aujourd'hui que les novas sont le résultat d'explosions d'étoiles parvenues, dans leur évolution, à un certain seuil d'instabilité. Au XVI^e siècle, cependant, on considérait les cieux comme immuables : aucune étoile nouvelle ne pouvait apparaître et la nova était forcément un phénomène du monde sublunaire, un *météore*.¹⁰ Or, Tycho démontra que la nova n'offrait aucune parallaxe appréciable, de sorte qu'elle se situait bien au-delà de Saturne, ce qui contredisait l'immuabilité et la perfection présumée des cieux. D'autre part, en 1577, Tycho observa une comète pendant plusieurs mois. Les comètes aussi étaient censées appartenir au monde sublunaire. Tycho démontra que la trajectoire de cette comète traversait les sphères des planètes sans empêchement, démontrant ainsi l'inexistence physique de ces sphères. Bien que les averroïstes considéraient déjà les sphères comme de pures inventions mathématiques, la plupart des gens instruits de l'époque les considéraient comme des objets matériels : on les imaginait faites d'un "cristal" transparent.

Tycho ne pouvait cependant accepter le système de Copernic, en partie pour des raisons religieuses, mais surtout en raison de l'absence de parallaxe des étoiles fixes. Il conçut son propre système du monde (Fig. 4.6), dans lequel la Terre est immobile au centre de l'Univers, la Lune et le Soleil tournent autour de la Terre et les cinq planètes tournent autour du Soleil. Mathématiquement, ce système est équivalent à celui de Copernic : il s'agit, en langage moderne, d'un simple changement de référentiel !

4.2.3 Kepler

Johannes KEPLER (1571/1630) fut engagé par Tycho Brahé comme assistant en 1600, peu avant la mort de ce dernier. Il hérita des données de Tycho et obtint le titre (et la pension) de "mathématicien impérial" qui lui permit de poursuivre ses recherches.

Bien avant de se joindre à Tycho, en 1596, il publia un ouvrage (le *Podromus dissertationum cosmographicarum continens mysterium cosmographicum*) dans lequel il apportait des arguments convaincants en faveur du

⁹Tycho arborait un nez en argent, prothèse remplaçant son véritable nez, perdu lors d'un duel. Son caractère colérique et son manque d'humilité envers le roi du Danemark le brouilla avec celui-ci, qui lui coupa les vivres et le força à chercher un autre mécène, l'empereur d'Allemagne. Enfin, il mourut des suites d'une infection de la vessie, semble-t-il causée par son refus de se lever de table pour satisfaire à un besoin naturel, afin de ne pas laisser ses invités seuls ! Cf. [40] pour une biographie. On peut aussi consulter, sur l'oeuvre de Tycho Brahé, les articles de GINGERICH [34] et de CHRISTIANSEN [14].

¹⁰Au sens ancien du terme, un météore est tout phénomène atmosphérique, comme la foudre ou la grêle ; du grec *meteôros* (μετέωρος), qui veut dire "élevé dans les airs".

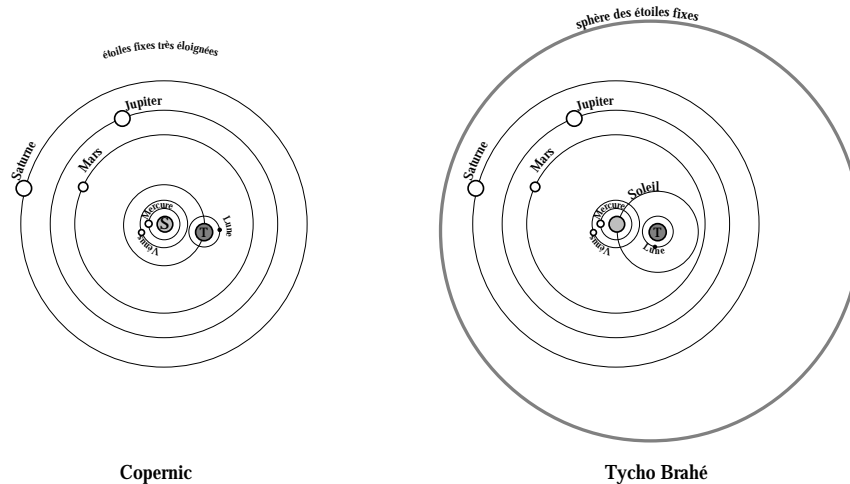


FIG. 4.6 : Schéma du système de Copernic (à gauche) comparé à celui de Tycho Brahé (à droite), qui préserve la position centrale de la terre.



FIG. 4.7: Johannes KEPLER (1571/1630)

système copernicien :

1. Il fit remarquer que, dans le système de Ptolémée, les épicycles des planètes extérieures sont de plus en plus petits quand on passe de Mars à Jupiter puis à Saturne, alors que les déférents sont de plus en plus grands, ce qui est une coïncidence fortuite, sauf si on accepte le système de Copernic dans lequel tout ceci devient évident.
2. Il fit aussi remarquer que les épicycles de ces planètes sont vus de la Terre avec un angle égal à celui avec lequel on observerait la Terre depuis ces planètes, dans le système de Copernic, ce qui lui semblait une coïncidence trop parfaite pour être le fruit du hasard. Notons ici le point de vue inusité de Kepler : il se place en imagination sur une autre planète pour observer la Terre, un point de vue qui constitue en soi une petite révolution.
3. Il remarqua que le système de Copernic est amélioré si on suppose que les plans des orbites des planètes passent par le centre du Soleil et non par le centre de la Terre, comme le supposait, étrangement, Copernic.
4. Enfin, dans cet ouvrage, Kepler propose un système par lequel les rayons des orbites des six planètes correspondent à des sphères mathématiques qui sont, en succession, inscrites et circonscrites dans les cinq polyèdres réguliers : le cube est inscrit dans la sphère de Saturne et il circonscrit la sphère de Jupiter ; suivent le tétraèdre, la sphère de Mars, le dodécaèdre, la sphère de la Terre, l'icosaèdre, la

sphère de Vénus, l'octaèdre et la sphère de Mercure. Cette idée saugrenue témoigne de "l'appel mystique" que les mathématiques inspiraient à Kepler. En dépit de son incompatibilité avec les données précises de Tycho, Kepler ne l'abandonna jamais [11].

Peu avant la mort de Tycho, Kepler se mit à étudier les observations de celui-ci sur le mouvement de Mars et cette étude se prolongea plusieurs années. Il trouva une différence de 8' entre les positions observées et les prédictions basées sur la théorie de Copernic améliorée, toujours basée sur des épicycles. Cette différence, ainsi que la confiance qu'il avait en les mesures de Tycho, le forcèrent, après quelques péripéties non exemptes d'erreurs se compensant mutuellement [90], à conclure que les planètes ne suivent pas des orbites circulaires avec épicycles, mais des orbites elliptiques. Il formula ses *deux premières lois* dans son *Astronomia Nova*, en 1609 :

1. Les orbites des planètes sont des ellipses dont le Soleil occupe un des foyers.
2. Si on trace un segment de droite entre le Soleil et une planète, ce segment de droite balaie des aires égales en des temps égaux.

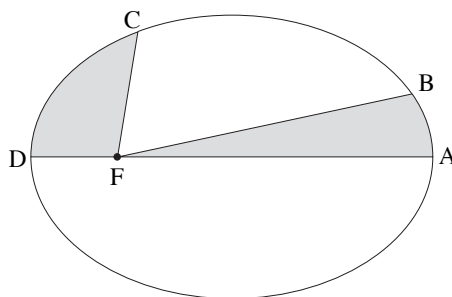


FIG. 4.8 : Schéma explicatif de la deuxième loi de Kepler. L'aire du secteur ABF est la même que celle du secteur CDF si le temps que la planète met de A à B est le même que de C à D.

En 1618, Kepler publie sa *troisième loi*, qui stipule que le rapport du carré de la période T d'une planète sur le cube du demi grand axe R de son ellipse est une constante, la même pour toutes les planètes :

$$\frac{T^2}{R^3} = \text{const.} \quad (4.17)$$

Il s'agit, comme pour les deux premières, d'une loi empirique, fondée uniquement sur l'observation. Les trois lois de Kepler seront plus tard démontrées théoriquement par Newton sur la base de la gravitation universelle et de la mécanique.

Vers la fin de sa vie, en 1627, Kepler publia les *tables rudolphines*, éphémérides basées sur ses trois lois et dédiées à John Napier, car l'usage des logarithmes en facilita grandement le calcul. Ces tables seront utilisées par les astronomes pendant un siècle. Kepler y prédit avec succès les passages de Mercure et de Vénus sur le Soleil : le caractère *prédictif* de la science commence à être plus assuré.

4.2.4 Galilée

Galileo GALILEI (1564/1642) (ou GALILÉE) est, avec Newton, la plus grande figure de la révolution scientifique. Nous verrons dans la section suivante comment il a été l'initiateur de la mécanique classique. Pour le moment, c'est sa contribution en tant qu'astronome qui nous intéresse.

Galilée était professeur à l'Université de Padoue (dans la république de Venise) au moment de ses découvertes ; le fait mérite mention car la plupart des scientifiques importants de cette époque n'étaient justement pas professeurs d'université !

En 1604, Galilée observa lui aussi une nova, comme Tycho en 1572, et parvint aux mêmes conclusions, c'est-à-dire que cette étoile nouvelle n'appartenait pas au monde sublunaire et que les cieux étaient donc



FIG. 4.9: GALILÉE (1564/1642)

sujets à changement. Sa plus grande contribution à l'astronomie survint en 1609, quand il construisit une *lunette astronomique* (télescope à lentilles) et qu'il la pointa vers les cieux. Galilée n'est pas l'inventeur de la lunette, mais il entendit parler de cet instrument mis au point indépendamment par plusieurs artisans dans les années qui précédaient et put en construire un à partir des descriptions qu'il en reçut. Il décrivit ses observations dans *Sidereus Nuncius* (le messager des étoiles) :

1. Il observa des montagnes et des plages sombres sur la surface de la Lune. Il remarqua que les sommets de ces montagnes étaient éclairés même si leur base se trouvait dans la zone d'ombre de la Lune. Il conclut aussi que la lumière cendrée observée quand la Lune est un mince croissant est un éclairage causé par la lumière solaire réfléchi sur la Terre (clair de Terre).
2. Il découvrit un grand nombre d'étoiles nouvelles : 80 étoiles dans le baudrier d'Orion au lieu des 9 connues alors. Il s'aperçut que la Voie lactée est en fait constituée d'étoiles distinctes très nombreuses et non pas une nébuleuse appartenant au monde sublunaire.
3. Il découvrit que Vénus présente des phases, comme la Lune, ce qui prouve hors de tout doute possible qu'elle est éclairée par le Soleil, n'émet pas de lumière propre et qu'elle tourne autour du Soleil.
4. Il découvrit 4 petites étoiles mobiles qui se tenaient à proximité de Jupiter et en conclut qu'il s'agissait de satellites de cette planète (Io, Callisto, Europe et Ganymède¹¹) comme la Lune est un satellite de la Terre. Ainsi, la Lune n'est plus un cas d'exception (une objection formulée contre le système de Copernic) : il y a d'autres satellites dans l'Univers.
5. La vision de Saturne l'intrigua. Sa lunette n'ayant pas une résolution suffisante, il ne put distinguer les anneaux de cette planète (Huygens le fit plus tard). Il eut l'impression que Saturne était divisée en trois parties : "J'ai observé la plus haute planète et je l'ai trouvée triple !"
6. Il observa des taches sur la surface solaire, ce qui contredit la notion de perfection et de pureté qui entoure cet astre.

Ce que Galilée vit dans l'objectif de sa lunette changea sa vie et notre conception de l'Univers. Il fut le premier, à notre connaissance et à la sienne, à utiliser un *instrument* pour amplifier les sens naturels de l'être humain, ou pour y suppléer. Il vit ce que personne ne vit avant lui et l'Univers dès lors "explosa", c'est-à-dire que ses limites disparurent. Le caractère artificiel des sphères célestes devint immédiatement évident.

Pendant ce temps, l'Église catholique (plus précisément, le Saint-Office), déclara "impie" la doctrine qui place le Soleil au centre du monde. Galilée poursuivit ses recherches et publia *Il Saggiatore* (L'essayeur) (1623) dans lequel il soutient énergiquement ses idées coperniciennes et le *Dialogue sur les deux principaux systèmes du monde* (1632) écrit sous forme d'un dialogue entre trois personnages (Simplicio, Salviati et Sagredo). Ce livre fut écrit en langue courante (italien) dans le but d'atteindre un plus large public. Malheu-

¹¹Galilée les nomme *planètes médicées*, pour honorer la famille des Médicis de Florence, ses protecteurs.

reusement, il atteignit aussi la Sainte Inquisition, qui intenta un procès à Galilée.¹² Après 21 jours de procès, un tribunal de sept cardinaux déclara :

Soutenir que le Soleil, immobile et sans mouvement local, occupe le centre du monde, est une proposition absurde, fausse en philosophie, et hérétique, puisqu'elle est contraire au témoignage de l'Écriture. Il est également absurde et faux en philosophie de dire que la Terre n'est point immobile au centre du monde ; et cette proposition, considérée théologiquement, est au moins erronée dans la foi.¹³

Galilée dut signer la formule d'abjuration et fut condamné à la réclusion perpétuelle dans sa maison d'Arctetri. Il y mourut le 8 janvier 1642. La légende raconte qu'immédiatement après avoir juré que le système de Copernic était faux et que la Terre était immobile, il dit tout bas : "et pourtant, elle tourne..."

4.3 La naissance de la mécanique

4.3.1 Stevin et la statique

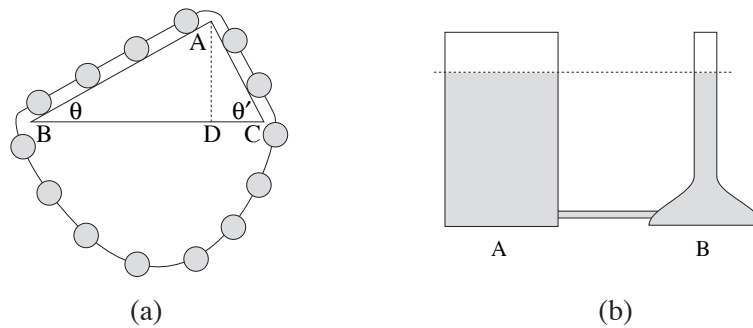


FIG. 4.10 : (a) Schéma utilisé par Stevin pour expliquer les composantes d'une force. (b) Schéma illustrant le principe des vases communicants.

La *statique*, l'étude de l'équilibre des objets et structures, est une discipline plus simple que la *dynamique*, l'étude du mouvement et de ses causes. La statique présente aussi un intérêt pratique évident dans l'art de l'ingénieur et a été cultivée dès l'Antiquité : Archimède avait élucidé le principe du levier. Il reste que les Anciens ne semblaient comprendre la statique que dans le cas où les forces sont parallèles ; autrement dit, ils n'avaient pas la notion de composantes d'une force (ou de vecteur). C'est Simon STEVIN (voir aussi plus haut, p. 4.1) qui résoudra cette difficulté, en introduisant la notion de parallélogramme de force. L'argument de Stevin pour introduire la nécessité des composantes fait appel à l'impossibilité du mouvement perpétuel : considérons le dispositif de la figure 4.10a. Si la composante tangentielle à la surface de la force de gravité s'exerçant sur le collier n'était pas la même des deux côtés du triangle, alors le collier serait en mouvement perpétuel (même avec frottement) autour du triangle. Le nombre de billes étant proportionnel à la longueur de chaque côté, la condition d'équilibre est donc

$$F(\theta)AB = F(\theta')AC \quad (4.18)$$

où $F(\theta)$ est la composante tangentielle de la force sur une seule bille quand le plan sur lequel elle repose est incliné d'un angle θ . Or, par trigonométrie élémentaire, on trouve

$$AD = AB \sin \theta = AC \sin \theta' \implies \frac{AB}{AC} = \frac{\sin \theta'}{\sin \theta} \quad (4.19)$$

¹²Cf GINGERICH, 1982 ; LERNER 1987.

¹³Cité par TATON, vol. II, p. 299.

Donc, les composantes tangentielles des forces sont telles que

$$\frac{F(\theta)}{\sin \theta} = \frac{F(\theta')}{\sin \theta'} \quad (4.20)$$

tel que prescrit par les méthodes vectorielles actuelles.

Stevin fit aussi faire des progrès importants à l'hydrostatique : il redécouvre le principe des *vases communicants* et utilise la notion de *pression*. Il démontre que la pression d'eau dans un contenant ne dépend que de la profondeur et est indépendante de la forme du contenant, d'où le paradoxe que la pression au fond du contenant B de la figure 4.10b est aussi grande qu'au fond du contenant A, même si le poids de l'eau dans B est beaucoup plus petit. Ce principe est à la base des presses hydrauliques. Les contributions de Stevin à la statique lui méritent amplement le surnom qu'on lui donne souvent : le *nouvel Archimède*. Signalons enfin que Stevin était aussi capable de réalisations pratiques surprenantes, tel un chariot à voile qui pouvait transporter 28 personnes plus rapidement qu'un cheval au galop, construit en 1600 pour le prince Maurice de Nassau des Pays-Bas.

4.3.2 Les travaux de Galilée

La formation que Galilée avait reçue à l'Université était tout à fait traditionnelle, dans la lignée scolastique et aristotélicienne. Galilée dut plus tard lutter contre sa propre formation pour réaliser ses découvertes, ce qui augmente d'autant son mérite. Les conceptions de Galilée sur le mouvement sont principalement décrites dans son *Dialogue* de 1632 et dans son dernier ouvrage, *Discours et démonstrations concernant deux sciences nouvelles*, paru en 1638.

Dans le *Dialogue*, Simplicio affirme que "la cause du mouvement descendant des parties de la Terre, tout le monde le sait, est la gravité", ce à quoi Salviati répond :

Tu te trompes, Simplicio. Tu devrais dire : ce que personne n'ignore, c'est que cette cause est appelée gravité. Mais je t'interroge non pas sur le nom, mais sur l'essence de cette chose. Excepté le nom imposé à cette chose et qui est devenu familier par l'usage, nous ne comprenons rien à la chose, pas plus à la vertu qui fait descendre une pierre qu'à celle qui fait tendre vers le haut une pierre projetée, ni qu'à celle qui meut la Lune sur son orbite...

Galilée soupçonne ici que l'orbite de la Lune et la chute des corps ont la même cause. D'autre part, il s'élève contre la tendance scolastique à nommer les choses pour se dispenser de les étudier et de les comprendre. Cependant, Galilée ne parviendra pas à élaborer une mécanique complète et cohérente (Newton y réussira 50 ans plus tard). Il parvient cependant à clarifier considérablement la cinématique (l'étude descriptive du mouvement).

La chute des corps Ainsi, Galilée montre, par expérimentation, que deux objets de masses différentes atteignent le sol pratiquement en même temps lorsque relâchés du haut d'une tour. Au contraire, selon Aristote, le temps que met un objet à tomber est inversement proportionnel à son poids. Cette affirmation d'Aristote est correcte uniquement dans le cas où les objets atteignent rapidement leur vitesse limite (déterminée par la résistance du milieu). L'air étant relativement peu dense, la phase d'accélération initiale des objets est prépondérante et la différence de temps de chute est négligeable. Galilée possédait le don d'imaginer ce qui se passerait dans des circonstances idéales : il réalise une expérience mais attribue les petites imperfections des résultats aux effets qui éloignent le problème de son idéalité. Ainsi, il conclut que, *si ce n'était de la résistance de l'air*, les deux objets atteindraient le sol en même temps. De la sorte, Galilée démontre clairement l'inexactitude de la physique d'Aristote, car l'objet deux fois plus lourd n'atteint pas la Terre en deux fois moins de temps que l'autre objet : leurs temps de chute sont à peine différents, de sorte qu'on entend un seul bruit lors de leur contact avec le sol.

Le mouvement uniformément accéléré En pratiquant une expérience sur un plan incliné, Galilée arrive à la conclusion que les distances parcourues en des temps égaux augmentent linéairement, ce qui implique que la distance totale parcourue est proportionnelle au carré du temps écoulé : c'est la description d'un mouvement uniformément accéléré. De même, la vitesse finale est proportionnelle au temps de chute, résultat déjà obtenu par Nicole Oresme trois siècles plus tôt.

Le principe d'inertie Galilée imagine aussi qu'un corps en mouvement sur une surface plane garde une vitesse et une direction constantes si on néglige la résistance de l'air et le frottement. C'est là le principe d'inertie, aussi connu sous le nom de "principe de Galilée", mais Galilée ne l'énonça jamais dans toute sa généralité. En fait, Galilée ne put imaginer un objet non soumis à la force de gravité, et ignorait la notion de force centripète.

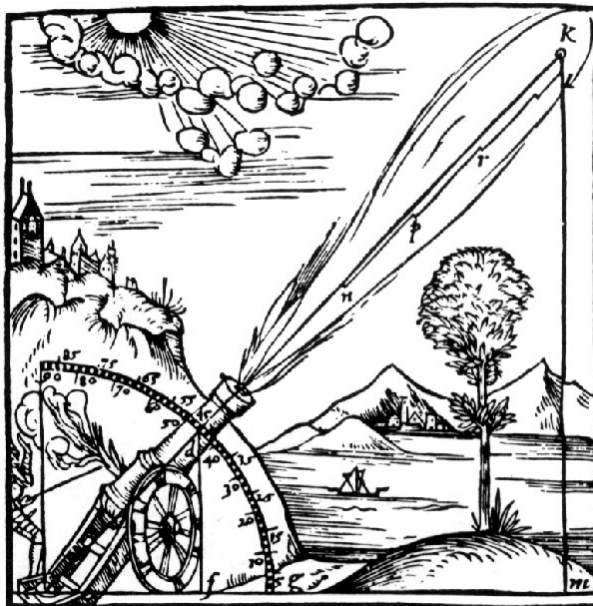


FIG. 4.11 : Pendant la Renaissance, on croyait, à l'instar d'Aristote, que le mouvement d'un projectile était constitué de deux phases : la première étant une trajectoire rectiligne (mouvement violent) et la deuxième une chute verticale (mouvement naturel). Galilée prétend au contraire qu'en l'absence de résistance de l'air, la trajectoire doit être parabolique.

La composition du mouvement Enfin, Galilée décrit correctement la *composition du mouvement* : sachant qu'un objet en roulement sur un plan se déplace à une vitesse constante et sachant qu'un objet relâché d'une certaine hauteur tombe avec une accélération uniforme, il conclut que le mouvement d'un objet qui, par exemple, roule sur une table jusqu'à son extrémité et tombe ensuite dans le vide suit une trajectoire *parabolique* : son mouvement peut être décomposé en mouvement horizontal, toujours uniforme en vitesse, et en mouvement vertical, uniformément accéléré. Les deux mouvements, "en se mélangeant, ni ne s'altèrent, ni ne se troublent, ni ne s'empêchent mutuellement".¹⁴ Ainsi, la *nature vectorielle* du mouvement, si longtemps ignorée, apparaît clairement à Galilée, qui légua donc à l'humanité le vecteur-vitesse, comme Stevin lui avait légué le vecteur-force.¹⁵ Pour démontrer à quel point cette notion était confuse avant lui, signalons qu'on exprimait souvent l'opinion qu'un projectile lancé horizontalement suit une trajectoire parfaitement horizontale, jusqu'à ce qu'il s'arrête, pour ensuite tomber verticalement !¹⁶

4.3.3 Descartes

L'héritage de René *Descartes* est mitigé. Ses travaux mathématiques et sa conception d'un Univers gouverné par des lois physiques rationnelles sont dignes d'admiration et ont eu une énorme influence jusqu'à ce jour. Par contre, ses travaux particuliers sur la mécanique et la physique sont décevants, en particulier si l'on songe à l'influence, plutôt mauvaise que bonne, qu'ils ont eue dans les décennies qui ont suivi leur publication.

¹⁴GALILÉE, Discours sur deux sciences nouvelles.

¹⁵Cependant, la notation vectorielle est beaucoup plus tardive : elle ne fut mise au point qu'au tournant du XXe siècle, par le physicien américain J.W. Gibbs.

¹⁶Cette préconception élémentaire est abondamment illustrée, avec beaucoup d'autres, dans le dessin animé *Road Runner*.

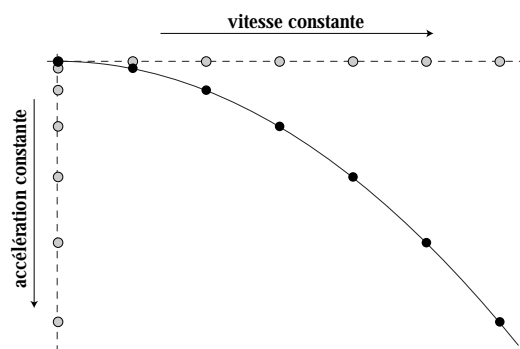


FIG. 4.12 : Mouvement parabolique comme composition d'un mouvement horizontal uniforme et d'un mouvement vertical uniformément accéléré.

Descartes est l'instigateur de la *philosophie mécanique* de la Nature. Il commença sa carrière scientifique en collaboration avec son mentor hollandais Isaac BEECKMAN (1588/1637), en 1618. Le mérite premier de Descartes, influencé en cela par Beeckman, est de retirer de la physique les explications "occultes" qui intervenaient dans l'enseignement scolastique.¹⁷ À la place, Descartes propose un monde où chaque événement a une *cause* précise, qui n'est pas le fruit d'une volonté, mais qui, au contraire, s'insère dans un ensemble de lois et de principes. On reconnaît ici les fondements de la pensée rationnelle moderne. Descartes refuse de considérer comme valables les explications faisant intervenir une volonté ou une finalité. Au contraire, les phénomènes physiques ne doivent être expliqués que par l'intervention de causes mécaniques immédiates, en particulier les collisions (chocs) entre différents objets ou parties d'objets. Les lois physiques sont immuables et suffisent alors à expliquer l'évolution du monde, sans faire appel à Dieu autrement que comme créateur de ces mêmes lois. On a plus tard énoncé la comparaison entre l'Univers de Descartes et une immense horloge qui fonctionne toute seule sans que Dieu n'ait besoin de la remonter !



FIG. 4.13: René DESCARTES (1596/1650)

Descartes a une *vision dualiste* de l'existence : il oppose l'esprit, ou la pensée (*res cogitans*), à la matière ou *étendue* (*res extensa*). Selon Descartes, l'esprit est le seul siège d'activité spontanée dans l'univers, alors que l'étendue ne fait que suivre les lois physiques. Descartes se méfie des sens car leurs données sont trompeuses et donc ne peut fonder sa philosophie sur l'expérience des sens. Au contraire, il la fonde entièrement sur la pensée, car il y voit le seul fondement solide duquel on ne peut douter.¹⁸ D'où la tendance chez lui d'accorder beaucoup d'importance aux mathématiques et moins d'importance à l'observation et l'expérience. Cette tendance lui permet cependant d'envisager que le monde extérieur, ou la réalité objective, est

¹⁷Laplace considérait Descartes comme "celui qui acheva la destruction de l'empire d'Aristote".

¹⁸On comprend dès lors l'attachement que lui professent les philosophes modernes. Hegel le considérait comme "le fondateur de la philosophie moderne".

assez différent du monde sensible.¹⁹

L'oeuvre la plus célèbre de Descartes est le *Discours de la méthode* (1637), dans lequel il explique sa méthode de raisonnement et insiste sur l'importance d'une méthode de pensée efficace :

Le bon sens est la chose du monde la mieux partagée : car chacun pense en être si bien pourvu, que ceux même qui sont les plus difficiles à contenter en tout autre chose, n'ont point coutume d'en désirer plus qu'ils en ont. En quoi il n'est pas vraisemblable que tous se trompent ; mais plutôt cela témoigne que la puissance de bien juger, et distinguer le vrai d'avec le faux, qui est proprement ce qu'on nomme le bon sens ou la raison, est naturellement égale en tous les hommes ; et ainsi que la diversité de nos opinions ne vient pas de ce que les uns sont plus raisonnables que les autres, mais seulement de ce que nous conduisons nos pensées par diverses voies, et ne considérons pas les mêmes choses. Car ce n'est pas assez d'avoir l'esprit bon, mais le principal est de l'appliquer bien.

Descartes tient absolument à distinguer le vrai de l'illusoire :

...ayant remarqué qu'il n'y a rien du tout en ceci : *je pense donc je suis*, qui m'assure que je dis la vérité, sinon que je vois très clairement que, pour penser, il faut être ; je jugeai que je pouvais prendre comme règle générale, que les choses que nous concevons fort clairement et fort distinctement sont toutes vraies ; mais qu'il y a seulement quelques difficultés à bien remarquer quelles sont celles que nous concevons distinctement.

Malheureusement, les choses qui paraissaient évidemment vraies à Descartes ne l'étaient pas nécessairement ! Ceci est particulièrement évident lorsqu'on examine en détail la physique proposée par Descartes.

La physique de Descartes La physique de Descartes, ainsi que son système du monde, est exposée dans *Principia philosophiæ* (les principes de philosophie), publié en 1644. Les idées de Descartes à ce sujet sont plus anciennes, mais il jugea prudent d'en retarder la publication, suite au procès de Galilée.²⁰ Dans cette oeuvre, Descartes explique un *système du monde* complet. Comme mentionné plus haut, sa vision est essentiellement mécanique : l'univers est une gigantesque machine qui fonctionne d'elle-même, du seul fait des lois du mouvement des corps. Même les animaux et l'être humain sont, en quelque sorte, des automates. Nonobstant les intuitions souvent radicalement modernes de Descartes, ce dernier se trompe généralement quant vient le temps de décrire en détail – et tout est fait de détails – le comportement du monde physique :

1. Il voit le monde matériel, ou l'*étendue*, comme un continuum en mouvement, tel un fluide, divisible à l'infini. Il distingue trois types de matière : (i) la matière commune, qui constitue les objets opaques ; (ii) les particules microscopiques formant l'éther, sorte de milieu qui pénètre tout, et (iii) la matière lumineuse provenant des étoiles. Les objets ne peuvent agir les uns sur les autres que par contact direct. En fait, les différentes parties de la matière se comportent un peu comme des boules de billard microscopiques dont les différentes grosseurs et les collisions déterminent seules toute la structure du monde visible. Il conçoit comme évidente l'impossibilité du vide. En cela il s'oppose à Galilée, qui croit (correctement) que le mouvement d'un projectile serait parabolique si on pouvait négliger la résistance du milieu. Descartes croit au contraire que c'est le milieu qui est la cause de la gravité ! Il s'oppose aussi à Pascal, qui a démontré expérimentalement, suivant Torricelli, que le vide est possible dans une colonne de mercure (découverte de la pression atmosphérique).
2. Il est le premier à énoncer correctement la loi d'inertie : tout objet conserve une vitesse constante (en grandeur et en direction), jusqu'à ce qu'il entre en collision avec un autre objet ; cependant, il se trompe quant aux propriétés de la collision elle-même : parmi les sept lois des chocs qu'il énonce, une seule est en fait correcte. Il définit tout de même (1640) la notion de quantité de mouvement $p = mv$, dans sa forme scalaire et non vectorielle. Il est essentiel pour lui que la quantité de mouvement totale soit conservée, afin que le mouvement ne s'épuise pas et que l'"horloge" que constitue l'Univers n'ait pas besoin d'être remontée...
3. Descartes explique le fait que nous ne sentions pas les contrecoups du mouvement de la Terre autour du Soleil par sa théorie des *tourbillons* : le système solaire est un immense tourbillon qui entraîne les

¹⁹On notera ici l'influence manifeste de Platon.

²⁰Descartes passa une grande partie de sa vie en Hollande, à Amsterdam, dans un climat de tolérance intellectuelle plus favorable que celui qui régnait dans les pays catholiques.

planètes et chaque planète (la Terre en particulier) est le centre d'un autre tourbillon, qui garde dans sa proximité la matière qui l'environne. Il explique ainsi pourquoi toutes les planètes du système solaire effectuent leur rotation autour du soleil dans le même sens.

4. Quant aux idées de Descartes sur les éléments et leur nature, elles nous apparaissent si loufoques aujourd'hui que nous hésitons à les décrire.

En somme, bien que le bilan de Descartes soit positif à l'égard des mathématiques et des idées scientifiques générales (l'Univers gouverné par des lois), il est plutôt négatif en ce qui concerne ses théories physiques particulières. En fait, la méthode même de Descartes est douteuse car elle repose en dernière analyse sur l'intuition seulement et non sur les expériences et les observations. Descartes tenta de remplacer le système complet enseigné par la scolastique par son propre système, malheureusement tout aussi vide de sens. Il négligea beaucoup trop l'expérimentation au profit de la pensée pure et d'une imagination non contrôlée. À une époque où les sciences étaient en plein éclosion, il s'enferma trop tôt dans son propre *système* et refusa d'accepter les faits qui ne s'y inséraient pas facilement. Il n'empêche que sa réputation fut immense. Citons le Père DANIEL (Voyage du monde de Descartes, 1687) :

Hors des classes [de l'université], on ne parle plus de thomistes, de scotistes, de nominaux, ou du moins on ne les distingue plus, on les met tous dans la même catégorie et dans le même parti, qu'on appelle l'ancienne philosophie, à laquelle on oppose la philosophie de Descartes ou la nouvelle philosophie.

L'influence de Descartes en physique même s'est prolongée au-delà de la révolution newtonienne. On peut affirmer que toutes les théories de l'éther, jusqu'à la fin du XIXe siècle, sont inspirées de l'*étendue* cartésienne.

4.3.4 Huygens

Christian HUYGENS (1629/1695) figure parmi les trois plus grands physiciens du XVIIe siècle, avec Galilée et Newton. Huygens, Hollandais, s'installa à Paris sous l'invitation de Colbert et y résida jusqu'à ce que la révocation de l'Édit de Nantes²¹ (1685) le force à retourner en Hollande (il était protestant). Au départ, Huygens était partisan des idées de Descartes, mais il changea progressivement d'opinion. Ses principales contributions sont exposées dans *Horologium Oscillatorium* (Le pendule oscillant, 1673), dans son *Traité de la lumière* (1690) et dans *De motu corporum ex percussione* (lois du choc de corps, 1669).

Les principales contributions de Huygens sont :

1. La théorie des collisions (choc des corps). La *Royal Society* de Londres ouvre un concours en 1666 pour la découverte des lois régissant les collisions. Huygens en donne la solution la plus complète. Il se concentre sur le cas de deux objets de même masse. Le point de départ de son analyse est : § Le principe d'inertie. § Le fait évident que deux corps de masses égales qui entrent en collision directe (frontale) rebondissent dans la direction opposée en conservant chacun sa vitesse. § Le principe de relativité : on peut examiner une collision à partir de plusieurs référentiels, sans que les lois qui la régissent en soient modifiées. Ainsi, on peut toujours se déplacer dans le référentiel du centre de masse (ou centre d'inertie) des deux corps.
2. Les travaux de Huygens supplantent donc les conceptions erronées de Descartes. Il traite aussi du cas de corps de masses inégales dans *De motu corporum ex percussione*.
3. La conservation de l'*énergie mécanique*. Ce qu'on appelle les *forces vives* à l'époque est en fait l'énergie cinétique (modulo un facteur 2 par rapport à la définition actuelle). Huygens montre que les forces vives sont conservées dans une collision élastique (sans altération des corps) et que le centre de masse d'un pendule, après une oscillation, remonte aussi haut qu'il était au départ, sauf pour l'effet de la résistance de l'air.
4. La compréhension du mouvement circulaire et la notion de force centrifuge. Huygens est mené à ce concept par ses travaux sur les horloges et le pendule conique. Il se place dans un référentiel tournant et affirme que, de ce référentiel, la force centrifuge apparaît aussi réelle que la gravité.

²¹L'Édit de Nantes, proclamé par Henri IV en 1598, accorde la liberté de culte aux protestants. Louis XIV le révoque en 1685 et plus de 200 000 protestants quittent la France pour la Hollande, la Prusse, etc. Il s'agit probablement de la plus grande erreur du règne de Louis XIV.

5. La théorie de la propagation des ondes, en particulier appliquée à la lumière. Nous reviendrons sur ce point ultérieurement.
6. L'amélioration de la lunette, par l'utilisation de trois lentilles. La découverte des anneaux de Saturne et de son satellite Titan. La conception des étoiles comme des Soleils éloignés.
7. La mise au point d'horloges à pendule précises, en particulier du pendule isochrone.

4.3.5 Newton

Isaac NEWTON (1642/1727) est placé très haut, sinon au plus haut rang, dans le temple de la renommée scientifique. Il a lui même affirmé que s'il avait accompli beaucoup, c'est parce qu'il s'appuyait sur les épaules de géants.²² Newton attribue même à Galilée la paternité de ce qu'on appelle les "deux premières lois de Newton" : le principe d'inertie et $F = ma$. En fait, Newton est trop généreux sur ce dernier point, même s'il est incontestable que Galilée eut une énorme influence sur lui [[25],[12]]. Il fut même influencé par Descartes, quoiqu'il en dît plus tard.



FIG. 4.14: Isaac NEWTON (1642/1727)

Sa vie Newton est né à la Noël 1642,²³ à Woolsthorpe (Lincolnshire), prématuré de deux mois, dans une modeste famille de fermiers propriétaires. Le père de Newton est mort avant sa naissance et sa mère se remaria à un clergyman quand il avait deux ans, de sorte que Newton fut en partie élevé par sa grand-mère et par son oncle. Ses études préuniversitaires ne laissèrent pas entrevoir le génie qui allait se manifester plus tard. Newton put entrer à l'université de Cambridge en 1661, mais au bas de l'échelle sociale : il dut exécuter de basses besognes pour ses camarades pour gagner un peu d'argent. À Cambridge, il trouva en Isaac Barrow, le premier *Lucasian professor of mathematics*,²⁴ un mentor de premier plan. Il lut les *Dialogues* de Galilée et les *Principes de philosophie* de Descartes et obtint un premier diplôme en 1665. Il aurait normalement continué en maîtrise lorsque la Grande Peste fit son apparition et obligea les autorités à fermer l'Université. Newton retourna chez lui jusqu'en 1667 et c'est là qu'il fit ses plus grandes découvertes : "J'étais dans la plénitude de mes facultés d'invention et occupé par les mathématiques et la philosophie [naturelle] plus qu'à aucune autre époque de ma vie." Newton retourna à Cambridge, reçut sa maîtrise en 1668 et l'année suivante Isaac Barrow renonça à sa chaire de professeur au profit de son élève. En 1696, Newton quitte Cambridge pour devenir directeur de la Monnaie Royale Britannique. Il est fait chevalier, meurt en 1727 et est inhumé à l'abbaye de Westminster, aux côtés des rois d'Angleterre.

²²Cette phrase est à comparer avec la citation de Bernard de Chartres, p. 3.4.3.

²³Ancien style. Le calendrier grégorien, adopté en 1582 dans le monde catholique, ne le fut qu'en 1752 en Angleterre, de sorte que les dates anglaises précédant 1752 réfèrent au calendrier julien (d'où l'expression "ancien style").

²⁴Parmi les détenteurs de la chaire lucasienne, mentionnons Newton, Airy, Babbage, Stokes, Larmor, Dirac, Hawking...

Newton, membre de la *Royal Society*, quitta cette société savante en 1673, écoeuré par les controverses suscitées par ses théories. Il aurait déclaré à ce moment “ne plus vouloir s’occuper de questions de philosophie” (c’est-à-dire de science).²⁵ Newton était d’une nature craintive et renfermée, fuyant la controverse. Il est probable que ces traits de caractère lui venaient de sa petite enfance malade. N’étant pas marié, Newton consacra toute son énergie à son oeuvre et supporta toujours très mal la critique. Il considérait les autres scientifiques comme des rivaux et fut toujours très jaloux du crédit qu’on devait lui attribuer pour ses découvertes.²⁶

Les Principia Même si plusieurs de ses découvertes datent de la période 1665/1667, il ne les publia pas tout de suite. C’est sur l’encouragement de l’astronome Edmund HALLEY qu’il publia, en 1687, ce qui est souvent considéré comme le plus grand ouvrage scientifique de tous les temps : les *Principes Mathématiques de la Philosophie Naturelle*, ou *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* (nous dirons *Principia*, pour abrégé²⁷). Citons la préface de Newton à la première édition :

... nous qui avons pour objet, non les Arts, mais l’avancement de la philosophie, ne nous bornant pas à considérer seulement les puissances manuelles, mais celles que la nature emploie dans ses opérations, nous traitons principalement de la pesanteur, la légèreté, la force électrique, la résistance des fluides & les autres forces de cette espèce, soit attractives, soit répulsives : c’est pourquoi nous proposons ce que nous donnons ici comme les principes mathématiques de la philosophie naturelle. En effet, toute la difficulté de la philosophie paraît consister à trouver les forces qu’emploie la nature, par les phénomènes du mouvement que nous connaissons, & à démontrer, par là, les autres phénomènes.²⁸

On reconnaît là les principes de la méthode hypothético-déductive, en particulier le souci d’expliquer les phénomènes physique par des lois mathématiques.

Les lois du mouvement Dès le premier chapitre, Newton énonce les trois lois suivantes :

1. Tout corps persévère dans l’état de repos ou de mouvement uniforme en ligne droite dans lequel il se trouve, à moins que quelque force n’agisse sur lui, & ne le contraigne à changer d’état.
2. Les changements qui arrivent dans le mouvement sont proportionnels à la force motrice, & le sont dans la ligne droite dans laquelle cette force a été imprimée [$F = ma$, en langage moderne].
3. L’action est toujours égale et opposée à la réaction ; c’est-à-dire, que les actions de deux corps l’un sur l’autre sont toujours égales, & dans des directions contraires.

Newton définit la *masse* comme quantité de matière et la *quantité de mouvement* comme le produit de la masse par la vitesse. Il considère à la fois l’espace et le temps comme *absolus*.

La gravitation universelle La plus grande réussite des Principia est la théorie de la *gravitation universelle*, selon laquelle deux corps de masses m_1 et m_2 exercent l’un sur l’autre une force d’attraction dirigée le long de la droite qui joint les deux corps et proportionnelle au produit de leurs masses et inversement proportionnelle au carré de la distance qui les sépare :

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (4.21)$$

L’adjectif “universelle” signifie que la force de gravité s’applique à tous les corps, terrestres ou célestes. Il n’y a plus de distinction entre mécanique terrestre et mécanique céleste : les mêmes principes fondamentaux s’appliquent partout. Newton racontait que, lorsqu’il réfléchissait à la cause du mouvement de la Lune, dans le jardin de sa maison de Woolsthorpe, il vit une pomme tomber soudainement de son arbre et heurter le sol à ses pieds. Il eut alors l’intuition que la force qui entraînait la Lune sur son orbite autour de la Terre était la même force qui attirait la pomme (et tous les objets terrestres) vers le centre de la Terre. Il semblait naturel à Newton de supposer que cette force diminue comme l’inverse du carré de la distance, car c’est ainsi que diminue l’intensité de la lumière quand on s’éloigne de la source. Il put démontrer que

²⁵Plus tard, après la mort de Hooke, Newton devint président de cette société savante.

²⁶Cf. [48], p. 147, pour un profil psychologique de Newton.

²⁷Le titre de cet ouvrage est une allusion à celui de Descartes (*Principia philosophiæ*).

²⁸Traduction de la Marquise du Chastellet, Paris, 1756.

la trajectoire d'un objet subissant une telle force est une ellipse et, plus généralement, il put démontrer les trois lois de Kepler. Il dut pour cela développer le calcul différentiel et intégral, véritable tour de force. Il dut aussi démontrer que la Terre attire les objets comme si toute sa masse était concentrée en son centre, ce qui aussi nécessite le calcul intégral. Newton put aussi affirmer que la Terre est légèrement aplatie, en raison de la force centrifuge associée à sa rotation sur elle-même, et ainsi expliquer le phénomène de la précession des équinoxes, en comparant la Terre à une toupie sur laquelle le Soleil exerce un couple (ou moment de force).

Newton et le rayon de la Terre Détail technique : comme Newton désirait comparer la force que la Terre exerce sur la Lune à celle qu'elle exerce sur un objet situé à sa surface, il devait connaître la distance Terre-Lune (connue essentiellement par des mesures de parallaxe) et le rayon de la Terre. Or, cette dernière quantité, pour être connue avec suffisamment de précision, nécessite mieux que la valeur qui nous est parvenue de l'Antiquité. En fait, la valeur dont Newton disposait au moment où il élaborait sa théorie montrait un désaccord de l'ordre de 10% avec ce que demandait son hypothèse de la gravitation universelle. Cependant, en 1684, il prit connaissance des mesures effectuées une quinzaine d'années plus tôt par l'Abbé Jean PICARD (1620/1682), qui mesura par triangulation la distance entre Amiens et Paris²⁹ (1°22'55" d'arc) et proposa une valeur assez précise du rayon de la Terre qui fit disparaître le désaccord de Newton et le persuada encore plus de la justesse de ses idées. Ceci est un exemple de l'interdépendance des progrès scientifiques : non seulement la théorie de Newton repose sur les idées de Galilée et les lois empiriques de Kepler, mais son degré de certitude (et sa publication) dépendait d'une mesure de précision effectuée peu avant, mesure possible grâce au perfectionnement des lunettes utilisées dans la mesure des angles.

Controverse Newton-Hooke. Remarquons ici que l'idée d'une force dirigée vers le Soleil (et non dans la direction de la vitesse de la planète) peut être attribuée à Robert HOOKE (1635/1703), qui cependant n'en comprit pas bien les implications, notamment sur la loi des aires (deuxième loi de Kepler). Même si Hooke avança l'idée que cette force varie en l'inverse du carré de la distance, Newton refusa de lui attribuer la paternité de la théorie de la gravitation universelle, car c'est une chose, disait-il, de lancer une idée en l'air et c'en est une autre de mener d'un bout à l'autre un travail cohérent où l'on démontre mathématiquement que la même idée s'applique effectivement. *Dixit* Newton :

N'est-ce pas amusant ? Les mathématiciens qui découvrent, résolvent et font tout le travail devraient se contenter de passer pour de stupides bêtes de calcul, tandis que celui qui ne fait rien qu'affecter de comprendre toutes choses recueille les mérites pour l'invention entière, ceux de ses successeurs comme ceux de ses prédécesseurs.

En fait, la controverse avec Hooke a eu le mérite d'accélérer la publication des idées de Newton, bien que ce dernier, à un point si excédé de cette querelle, menaça de tout laisser tomber. C'est Halley qui, bon diplomate, le persuada de continuer. Hooke a au moins le mérite d'avoir attiré l'attention de Newton sur l'étude du mouvement curviligne, elliptique en l'occurrence.

Réaction des cartésiens. Les partisans de Descartes s'opposèrent à l'idée de la gravitation universelle, car elle supposait une *action à distance* entre les objets, alors que les cartésiens croyaient que toute interaction devait se faire par contact, comme lors d'une collision. Étrangement, ils voyaient dans la gravitation universelle un retour à la vieille physique scolastique, avec ses propriétés "occultes", non concrètes. Ils questionnèrent donc Newton sur la "nature" de l'attraction gravitationnelle. Newton réfuta très bien les thèses de Descartes en expliquant que la présence d'un fluide remplissant l'Univers ne pourrait que freiner le mouvement et non pas causer une attraction entre les planètes. Quant à la cause de la force de gravité, il s'abstint d'en parler en affirmant qu'il n'imaginait pas d'hypothèses à ce sujet.³⁰ Il se contenta de dire que l'hypothèse d'une loi de force en inverse du carré de la distance explique merveilleusement les lois de Kepler (ce que la physique de Descartes était à mille lieux de faire), le mouvement des comètes, les marées, etc.

Les idées de Newton ne se diffusèrent pas très rapidement. En Angleterre, il fallut attendre la traduction en anglais des *Principia* pour qu'un public étudiant plus large y ait accès. En France, c'est Maupertuis, vers 1730, qui défendit la théorie de Newton devant l'Académie des Sciences. Enfin, Voltaire publia en 1738

²⁹Sur l'Abbé Picard, cf. [85], p. 266.

³⁰La phrase exacte de Newton est *hypotheses non fingo* (littéralement : je ne feins pas d'hypothèses).

un ouvrage appelé *Éléments de la philosophie de Newton*, dans lequel il vulgarise et défend la théorie de la gravitation universelle. La mécanique de Newton est ensuite acceptée par la communauté scientifique du Continent qui la propulse encore plus loin par sa connaissance supérieure du calcul infinitésimal.

L'oeuvre de Newton est capitale parce qu'elle constitue la première synthèse cohérente de la physique connue. Certes, elle est incomplète, mais elle explique le mouvement des planètes et les mouvements terrestres avec un minimum d'hypothèses (elle ne multiplie pas les concepts inutiles). Son édifice mathématique lui permet de faire des prédictions et ne recèle pas de contradictions internes. On peut justement affirmer que si Descartes a *mécanisé* le monde en affirmant qu'il était soumis à des lois invariables, Newton l'a *mathématisé*, en donnant à ces lois une forme mathématique se prêtant à des prédictions et des explications précises. C'est à Newton qu'on doit la première véritable théorie physique.

4.4 La naissance de la méthode expérimentale

À partir du XVII^e siècle, au moment où les esprits se libèrent de la tradition scolastique et des arguments d'autorité, la méthode expérimentale peut se développer librement. Nous avons vu plus haut (p. 3.4.5) comment Roger Bacon préconisa le recours à l'expérience. Son homonyme, l'avocat anglais Francis Bacon (1561/1626), fut le plus célèbre défenseur de la méthode expérimentale au début du XVII^e siècle. Ses oeuvres principales sont *The advancement of Learning* (1605) et surtout le *Novum Organum* (1620, sous-titré *ou les vraies suggestions pour l'interprétation de la nature*). Cette dernière oeuvre est ainsi appelée par opposition à l'*Organon* d'Aristote, qu'elle voulait remplacer. Bacon y tente une nouvelle classification des sciences, vante les mérites de la méthode expérimentale et encourage les amateurs à persévérer :

Les hommes font généralement leurs expériences sans soin, et comme si c'était dans le sport, faisant quelques petites variations dans les expériences connues, et s'ils échouent ils sont dégoûtés et renoncent à leur projet ; même s'ils se mettent au travail plus sérieusement, fermement et assidûment, alors ils perdent tout leur temps en essayant quelque matière isolée, comme Gilbert sur l'aimant, et les alchimistes sur l'or... Personne ne peut avec succès chercher la nature d'un objet en considérant cet objet seul ; l'enquête doit être plus généralement étendue.

Mais Bacon n'est pas un scientifique talentueux lui-même, et les applications qu'il fait de la méthode expérimentale sont malheureuses, car elles se veulent trop systématiques et dénotent un manque d'imagination. De plus, Bacon sous-estime l'importance des mathématiques dans l'étude de la Nature. Contrairement à ce que Bacon énonce dans la citation ci-haut, il est généralement très utile de focaliser sa recherche sur un objet particulier, sans chercher à comprendre tout l'univers en même temps. Par son attitude trop métaphysique, Bacon préfigure de peu Descartes et commet à peu près les mêmes erreurs générales. Bacon joue néanmoins un rôle important de *stimulateur* de la recherche expérimentale.

La controverse philosophique initiale entourant la méthode expérimentale tient à son caractère partiellement *inductif* et non simplement *déductif*. Aristote, en grand codificateur de la logique qu'il était, rejetait la possibilité de démontrer une hypothèse par l'observation de ses conséquences, parce que contraire à la logique. Autrement dit, si l'hypothèse A implique nécessairement la conséquence B, on ne peut pas conclure à la validité de A si B est effectivement observé (par contre, la non observation de B implique la fausseté de A). Or, la méthode expérimentale a justement recours à l'hypothèse : on peut l'appeler aussi *méthode hypothético-déductive*. De fait, on dit souvent qu'on ne peut pas démontrer la véracité d'une théorie scientifique, mais seulement sa fausseté. Cependant, si une théorie scientifique (ou une simple hypothèse) n'est pas démentie par toute une série d'observations et si, de surcroît, elle permet de prédire des observations auxquelles personne n'avait pensé et que ces observations sont plus tard confirmées, alors cette théorie ou hypothèse devient *utile* et peut être acceptée comme vraie par la communauté scientifique, quitte à être démentie plus tard par de nouvelles expériences. En fait, les théories scientifiques sont des constructions complexes comportant plusieurs hypothèses et références enchevêtrées, sur lesquelles la logique formelle a relativement peu de prise, même si les raisonnements exacts – en particulier de nature mathématique – y jouent un rôle essentiel.

Descartes trouve tout-à-fait légitime de justifier une hypothèse par ses conséquences :

Que si quelques unes de celles dont j'ai parlé au commencement de la *Dioptrique* et des *Météores* choquent d'abord, à cause que je les nomme des suppositions, et que je ne semble pas avoir envie de les prouver, qu'on ait la patience de lire le tout avec attention et j'espère qu'on s'en trouvera satisfait : car il me semble que les raisons s'y entre-suivent en telle sorte, que comme les dernières sont démontrées par les premières qui sont leurs causes, ces premières le sont réciproquement par les dernières qui sont leurs effets.³¹

Descartes ici n'est pas très subtil et Aristote aurait juste droit de le critiquer. Un point de vue plus soigné est exposé par Edme MARIOTTE (1620/1684), dans son *Essai de logique* :

Si une chose étant posée il s'ensuit un effet ; et ne l'étant point, l'effet ne se fait pas, toute autre chose étant posée : ou si en l'ôtant, l'effet cesse ; et ôtant tout autre chose, l'effet ne cesse point : cette chose-là est nécessaire à cet effet, et en est cause.

Plus loin, il écrit :

Une hypothèse d'un système [d'une théorie] est plus vraisemblable que celle d'un autre, lorsqu'en le supposant on rend raison de toutes les apparences [observations], ou du plus grand nombre d'apparences, plus exactement, plus clairement, et avec plus de rapport aux autres choses connues, mais, s'il y a une seule apparence qui ne puisse convenir à une hypothèse, cette hypothèse est fautive ou insuffisante.

Si on saute deux siècles, on retrouve la vision succincte suivante de la méthode expérimentale, telle qu'exprimée par Claude Bernard dans son oeuvre célèbre, *Introduction à l'étude de la médecine expérimentale*, un classique du genre [7] :

L'expérimentateur veut arriver au *déterminisme*, c'est-à-dire qu'il cherche à rattacher, à l'aide du raisonnement et de l'expérience, les phénomènes naturels à leurs conditions d'existence, ou, autrement dit, à leurs causes prochaines. Il arrive par ce moyen à la loi qui permet de se rendre maître du phénomène. Toute la philosophie naturelle se résume en cela : *connaître la loi des phénomènes*. Tout le problème expérimental se réduit à ceci : *prévoir et diriger les phénomènes*.

Claude Bernard se laisse d'ailleurs emporter contre les constructeurs de systèmes, en particulier certains philosophes, qui prétendent tout déduire de quelques principes fondamentaux *a priori* de leur cru :

Il ne peut y avoir de vrais philosophes que parmi les savants. Le philosophe qui n'est pas savant est stérile et orgueilleux. Il se figure qu'il enfante toutes les découvertes par les idées qu'il émet à leur occasion. La philosophie est le résultat des connaissances ; les connaissances ne sont pas le résultat de la philosophie.

mais il reconnaît l'importance de la théorie dans la méthode expérimentale :

Pour être digne de ce nom, l'expérimentateur doit être à la fois théoricien et praticien. S'il doit posséder d'une manière complète l'art d'instituer les faits d'expérience, qui sont les matériaux de la science, il doit aussi se rendre compte clairement des principes scientifiques qui dirigent notre raisonnement au milieu de l'étude expérimentale si variée des phénomènes de la nature. Il serait impossible de séparer ces deux choses : la tête et la main, Une main habile, sans la tête qui la dirige, est un instrument aveugle ; la tête sans la main qui réalise reste impuissante.

Les quelques citations ci-haut n'avaient pour but que d'illustrer comment la notion de science expérimentale s'est cristallisée dans les esprits à partir de la révolution scientifique. L'application pratique de la méthode expérimentale varie d'une discipline à l'autre et il serait difficile d'en donner un exposé général, sauf à travers les développements particuliers de chaque secteur, ce qui sera fait implicitement dans les chapitres suivants.

³¹René Descartes, *discours de la méthode*.

Chapitre 5

Lumière, électromagnétisme et relativité

Avertissement : À partir de ce chapitre, nous suivons une structure plus thématique que chronologique, afin de ne pas transformer ces notes en une énumération pêle-mêle de découvertes reliées par la seule chronologie. Les quatre chapitres suivants sont consacrés à l'investigation de la structure de la matière et de sa transformation. Paradoxalement, les deux prochains chapitres traitent des aspects les plus immatériels du monde matériel : la lumière et la chaleur. Nous commençons (chap. 5) par relater l'évolution de nos conceptions sur la lumière et l'électricité (les deux sujets sont *a posteriori* étroitement liés), ce qui mène naturellement à la révolution de nos conceptions d'espace et de temps que fut la théorie de la relativité. Dans le chapitre suivant (chap. 6), nous tournons notre attention vers l'étude de la chaleur et des gaz. Dans un troisième temps (chap. 7), nous effectuons un retour en arrière à partir de l'alchimie et brosons un tableau succinct de l'évolution des idées sur la nature des transformations chimiques et sur la théorie atomique. Enfin, au chapitre 8, nous voyons comment, au tournant du XXe siècle, s'est dévoilée la structure microscopique de la matière et comment cette découverte a révolutionné les conceptions du mouvement héritées du XVIIe siècle. Il va sans dire qu'une telle séparation est périlleuse, en particulier entre les chapitres 6 et 7, car plusieurs développements importants des deux chapitres se sont mutuellement influencés et sont parfois l'oeuvre d'une même personne.

5.1 Visions de la lumière

5.1.1 Les anciens, la lumière et la vision

Les premières conceptions sur la lumière sont inséparables du problème de la *vision*. Nous distinguerons trois théories que les anciens avaient à ce sujet.

1. Les *atomistes* anciens croyaient que la vision est causée par l'arrivée dans l'oeil d'une réplique éthérée de l'objet observé. Autrement dit, de chaque objet sont projetées en permanence une myriade d'émanations appelées *simulacres*, ou *écorces*, qui ont la forme de l'objet et qui, en s'approchant de l'oeil, s'amenuisent de manière à le pénétrer et à nous communiquer une sensation de la forme de l'objet. Dans cette curieuse conception, la lumière n'existe pas : ce sont les simulacres qui se déplacent et qui causent la vision.
2. Les *Pythagoriciens* avaient de la vision une théorie tout-à-fait différente. C'est l'oeil, selon eux, qui émet des rayons en direction des objets observés. Ces rayons émanent en fait du *feu intérieur* contenu dans chaque être vivant. L'un des arguments appuyant cette théorie est le suivant : si on cherche un petit objet, comme une aiguille, qui est tombé par terre, on ne peut le trouver que si notre regard *tombe sur lui*. Il y a donc quelque chose (qu'on surnomme le *quid*, en latin) qui émane de nos yeux en ligne droite et se dirige vers les objets observés. Les pythagoriciens prétendaient que les chats ont un feu intérieur plus intense que les humains, ce qui leur permet de voir la nuit. *Euclide* est un adepte de cette théorie

pythagoricienne. Il a publié un ouvrage sur le sujet : *l'Optique*.¹ Par ailleurs, la théorie d'Euclide est essentiellement géométrique : elle décrit les ombres, la réflexion de la lumière sur un miroir plan ou sphérique, la réfraction. On y trouve l'égalité de l'angle de réflexion à l'angle d'incidence : $i = i'$, mais la réfraction est incorrectement décrite.

3. Enfin, *Aristote* s'oppose à l'idée que l'oeil émet la lumière, pour la plus simple des raisons : si l'oeil émettait la lumière, nous pourrions voir la nuit aussi bien que le jour. Aristote pense plutôt que la sensation de vision est causée par une propagation de l'objet vers l'oeil, à travers le milieu intermédiaire. Aristote croit donc que l'oeil ne pourrait voir dans le vide (il rejette l'existence du vide de toute manière). Aristote donne donc à la lumière une existence indépendante, mais cette conception plus moderne de la lumière ne sera pas généralement adoptée dans l'Antiquité, en dépit de la grande influence d'Aristote dans tous les autres domaines.

Alhazen ALHAZEN (IBN AL-HAYTHAM) est le plus grand physicien arabe du moyen-âge et peut être considéré comme le fondateur de l'optique. Selon lui, la lumière a une existence indépendante de l'objet qui l'émet et de l'oeil qui la reçoit. L'oeil ne peut sentir un objet que par l'intermédiaire de la lumière que cet objet lui envoie. La lumière est d'abord émise par des objets autolumineux (*sources principales*) et elle se propage en ligne droite. Il considère aussi une *émission secondaire* de lumière, par une *source accidentelle*, plus faible, tel un grain de poussière (cette idée préfigure la conception de Huygens). Il énonce les lois de la réflexion et les explique par analogie avec le rebondissement d'une particule sur un mur, une approche remarquablement moderne. Mieux encore, il explique la réfraction par un changement de vitesse de la lumière à l'interface entre les deux milieux, exactement comme le feront Descartes et Newton plus tard. Cette façon de penser préfigure la composition des mouvements de Galilée. Après observation, il conclut, incorrectement, que l'angle de réfraction est proportionnel à l'angle d'incidence (cette conclusion est cependant correcte dans la limite des petits angles). Il croit, incorrectement aussi, que l'image de la vision se forme dans le cristallin et non sur la rétine.

Dietrich de Freiberg En Occident, au moyen-âge, l'oeuvre d'Alhazen est traduite et diffusée. On commence même à utiliser des verres correcteurs, formés de lentilles convexes, pour corriger la presbytie. Le moine polonais WITELLO (1220/1275) publie des tables d'angles de réfraction en fonction de l'angle d'incidence dans différents milieux. Mais la plus grande figure de l'optique en Occident au moyen-âge est DIETRICH (ou THIERRY) de FREIBERG (?/1311), le premier à donner une explication satisfaisante de l'arc-en-ciel :

1. Il comprend que l'arc-en-ciel est causé par la réfraction et la réflexion de la lumière solaire par des fines gouttelettes d'eau et étudie par conséquent la réflexion et la réfraction dans une fiole de verre remplie d'eau pour modéliser la gouttelette.
2. Il conclut que l'arc principal est dû à la combinaison de deux réfractions et d'une réflexion sur la face interne de la goutte.
3. Il observe que la couleur de la lumière observée à travers la fiole change en fonction de l'angle que fait la fiole avec la source lumineuse (le Soleil). Elle paraît rouge quand cet angle est de 42° et la couleur passe vers le bleu si cet angle est diminué. Il en conclut que les différentes couleurs de l'arc-en-ciel proviennent de gouttelettes différentes, situées à des angles différents par rapport à l'observateur.
4. Il affirme que l'arc secondaire est situé à 11° au-dessus de l'arc principal et explique qu'il est causé par deux réfractions et deux réflexions à l'intérieur des gouttelettes, ce qui explique que l'ordre des couleurs est inversé.
5. Il conçoit la lumière comme composée d'un mélange de deux qualités : l'éclat et l'obscurité. La lumière rouge comporte plus d'éclat et la lumière bleue plus d'obscurité, alors que la lumière blanche est un mélange équilibré. La lumière rouge est moins réfractée que la bleue justement parce qu'elle contient plus d'éclat et que cette qualité, vertu positive, s'écarte moins du droit chemin, alors que l'obscurité s'en éloigne plus ! Des considérations morales influencent étrangement sa théorie.

Kepler En plus de ses travaux en astronomie, Kepler a aussi écrit sur l'optique : *Ad Vitellionem paralipomena* (1604). Dans ce traité, il introduit la notion d'image virtuelle et explique comment une image peut

¹Un autre ouvrage, autrefois attribué à Euclide, la *Catoptrique*, est probablement l'oeuvre de Théon d'Alexandrie.

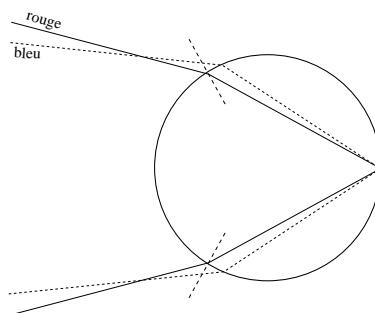


FIG. 5.1 : Schéma de la réfraction et réflexion de la lumière dans une gouttelette, expliquant le phénomène de l'arc-en-ciel. Le rayon rouge sortant de la goutte fait un angle de 42° avec le rayon entrant. Le rayon bleu est plus réfracté, mais l'écart angulaire entre les rayons bleus entrant et sortant est moindre, de sorte que le bleu apparaît vers le centre de l'arc et le rouge vers l'extérieur.

être formée par la combinaison de divers rayons émanant du même point. Il explique correctement la vision comme procédant de la formation d'une image sur la rétine. Il explique ensuite comment les lunettes peuvent corriger la vision.

Descartes et la loi de la réfraction Kepler, comme Alhazen, observe que l'angle de réfraction est proportionnel à l'angle d'incidence quand les angles sont petits. En fait, la relation correcte entre les deux angles est que le rapport $\sin r / \sin i$ est constant. Cette loi a été établie expérimentalement par Willebrord SNELL (1580/1626) mais non publiée. Le premier à y apporter une sorte d'explication théorique est Descartes, dans sa *Dioptrique* (1637).² Sa pensée là-dessus est la même que celle d'Alhazen : il explique que la lumière court plus vite dans les milieux plus denses et que la composante de la vitesse du rayon perpendiculaire à l'interface est modifiée en conséquence, alors que l'autre composante ne l'est pas, "car il est bien aisé à croire que l'action, ou inclination à se mouvoir, que j'ai dit devoir être prise pour la lumière, doit suivre en ceci les mêmes lois que le mouvement." Il est alors simple de démontrer que la relation entre les angles i et r est

$$\frac{\sin r}{\sin i} = \frac{v_i}{v_r} \quad (5.1)$$

où v_i et v_r sont les vitesses de la lumière dans le milieu incident et dans le second milieu, respectivement. Descartes considère la lumière comme un phénomène de pression qu'une matière subtile exerce de proche en proche jusqu'à la rétine. Il compare la vision à la sensation du toucher qu'utilise un aveugle pour se diriger :

...la lumière n'est autre chose, dans les corps qu'on nomme lumineux, qu'un certain mouvement, ou une action fort prompte et fort vive, qui passe vers nos yeux, par l'entremise de l'air et des autres corps transparents, en même façon que le mouvement ou la résistance des corps, que rencontre cet aveugle, passe vers sa main, par l'entremise de son bâton.

Il affirme que la lumière est un phénomène instantané (vitesse de propagation infinie). Pourtant, sa démonstration de la loi de Snell par analogie avec un phénomène de collision, en utilisant un modèle de particules en mouvement, nécessite une vitesse de propagation finie de la lumière. Sa théorie contient donc des contradictions évidentes.

Le principe de Fermat Pierre de Fermat rejette l'explication de Descartes pour la réfraction, car il lui semble absurde que la lumière se propage plus rapidement dans un milieu plus dense. Il suppose le contraire et réussit à démontrer la loi de Snell en invoquant le *principe du moindre temps* : la lumière se propage entre deux points de manière à minimiser le temps de parcours entre ces deux points. Si les deux points sont dans le même milieu, la trajectoire du rayon est une droite. Si le premier point (A) est dans l'air et le second (B) dans le verre, comme la lumière voyage plus vite dans l'air (selon Fermat), elle peut

²Descartes connaissait les travaux de Snell, qui lui avait communiqué ses résultats.

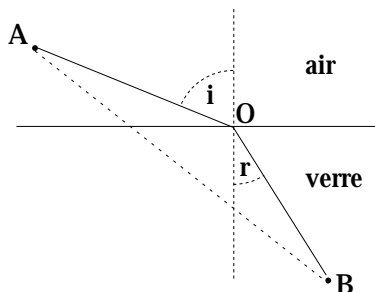


FIG. 5.2: Schéma de la réfraction d'un rayon lumineux à une interface, par exemple entre l'air et le verre.

minimiser le temps de parcours en allongeant son chemin dans l'air et en diminuant son chemin dans le verre, plutôt que d'emprunter le chemin direct AB. On montre facilement que le chemin le plus court en temps (AOB) est caractérisé par la relation inverse de celle de Descartes :

$$\frac{\sin r}{\sin i} = \frac{v_r}{v_i} \quad (5.2)$$

L'explication de Fermat est rejetée par les cartésiens parce qu'elle fait appel à un argument *téléologique*, c'est-à-dire qui suppose une fin bien précise. Comment, se demandent-ils, la lumière peut-elle connaître son point d'arrivée à l'avance pour ainsi calculer le chemin qui minimise le temps requis ? Les cartésiens considèrent plutôt que la lumière détermine à chaque instant la position où elle sera l'instant suivant, sans plus. En fait, le principe de Fermat est correct et il n'est pas besoin d'invoquer un principe téléologique pour le justifier car il peut être démontré par la théorie ondulatoire de la lumière. D'ailleurs, on sait depuis le milieu du XIX^e siècle que la lumière se propage effectivement plus lentement dans un milieu plus dense.

5.1.2 Diffraction et dispersion

Au début du XVII^e siècle, les phénomènes de réflexion et de réfraction sont bien connus et leur explication est le but premier des premières théories de la lumière. Bientôt, d'autres phénomènes sont observés, qui compliquent sensiblement le tableau :

La diffraction Le jésuite italien Francesco Maria GRIMALDI (1618/1663), avec une attitude proche de celle de Galilée, décide qu'il faut tester expérimentalement toutes les idées reçues sur la lumière avant de les accepter. Pour vérifier si la lumière se propage effectivement en ligne droite, il fait passer un faisceau lumineux par un minuscule orifice, obtient ainsi un mince pinceau de lumière, qu'il envoie contre un objet très mince (un cheveu). Derrière l'objet, sur l'écran, il voit non pas une ombre nette du cheveu, mais une ombre floue limitée par une série de franges colorées ! Grimaldi vient de découvrir la *diffraction* de la lumière (le mot est de lui). Il montre que le patron de diffraction ne dépend pas de la nature de l'obstacle, mais uniquement de sa taille. Il cherche premièrement à interpréter le phénomène à l'aide d'un modèle ondulatoire de la lumière, mais il ne réussit pas à inférer les bonnes conclusions de ce modèle et le rejette (un traitement mathématique correct d'une théorie ondulatoire est plus difficile que pour la mécanique et est au-delà des capacités du XVII^e siècle : il ne sera formulé qu'au XIX^e siècle). À la place, il invoque un modèle comparant la lumière à un fluide subtil. Son modèle ne peut pas tout expliquer, néanmoins, et Grimaldi a l'honnêteté scientifique de relater les succès comme les succès de sa théorie.

La dispersion La dispersion de la lumière désigne la séparation d'un faisceau de lumière blanche en plusieurs couleurs lors de sa réfraction par un prisme ou un autre objet transparent. Ceci avait déjà été observé par Dietrich de Freiberg, qui croyait que les différentes couleurs obtenues étaient une propriété inhérente à la lumière, mais révélée par la réfraction. Descartes, au contraire, croyait que les différentes couleurs étaient causées uniquement par la surface du milieu réfringent : les particules de lumière sont toutes identiques avant de frapper la surface, mais cette dernière les affecte différemment et produit ainsi

des couleurs différentes. En 1666, Newton réfute cette affirmation en réalisant une expérience cruciale à l'aide de deux prismes :

1. Il disperse un rayon de lumière à l'aide d'un premier prisme, isole l'une des couleurs qui en résulte et la dirige vers un deuxième prisme. Le deuxième faisceau, d'une seule couleur, ne se disperse pas.
2. Il dispose le deuxième prisme de manière opposée au premier, envoie sur lui l'ensemble des rayons dispersés par le premier et parvient à recombinaison les rayons de couleurs différentes en un seul faisceau de lumière blanche.

Ceci indique clairement que les différentes couleurs sont des parties inhérentes de la lumière blanche, c'est-à-dire que celle-ci est composée d'un *mélange* de plusieurs couleurs.

5.1.3 La théorie corpusculaire de Newton

Newton propose, très tôt, une théorie corpusculaire de la lumière. Il attend cependant très longtemps avant de publier cette théorie : son *Opticks (traité d'optique)* ne paraît qu'en 1704, presque 40 ans après ses premiers travaux sur le sujet. Newton donne une explication mécanique aux phénomènes lumineux. En cela il partage le point de vue de Descartes, mais là s'arrête la comparaison, car Newton tente de déduire de manière rigoureuse le plus de conséquences possibles de sa théorie.

Premièrement, il affirme que la réfraction est due à une force s'exerçant sur les particules de lumière, force qui n'existe qu'à l'interface entre différents milieux. Cette explication permet d'expliquer, comme Descartes, la loi de Snell, par une augmentation ou une diminution de la composante normale de la vitesse des particules de lumière et par le maintien de l'autre composante. Il doit donc supposer que la lumière se propage plus rapidement dans les milieux plus denses, mais cela ne le dérange nullement, car en dehors des interfaces la lumière ne rencontre aucune résistance : sa vitesse est constante par le principe d'inertie. Pour expliquer la dispersion, Newton propose que la lumière est un mélange de différents types de particules selon les couleurs et que la force superficielle, cause de la réfraction, est différente selon les couleurs (plus grande pour le bleu, plus faible pour le rouge).

La difficulté majeure dans ce modèle est la suivante : un faisceau de lumière n'est jamais complètement réfracté : il y en a toujours une partie qui est réfléchi. En plus de cela, lorsqu'un faisceau subit des réflexions et réfractions multiples entre deux surfaces, on observe une série de franges colorées comme pour la diffraction. Ce sont les célèbres *anneaux de Newton*, observés à travers une lentille convexe qu'on pose sur une surface réfléchissante. Le premier modèle de Newton ne peut pas expliquer de tels phénomènes. Il complique son modèle de manière abusive, en supposant l'existence d'un milieu extrêmement subtil et rigide, appelé *éther*, qui remplit tout l'espace, même quand l'air en a été évacué. Lorsque les particules de lumière frappent un milieu, une vibration de l'éther se propage très rapidement (plus rapidement que la lumière) à travers tout le milieu et y crée des zones plus ou moins favorables à la réflexion et à la réfraction, que Newton appelle *accès*. Les corpuscules sont donc en partie réfléchis et en partie réfractés, selon la zone qu'ils frappent à l'intérieur du milieu. Sa théorie n'est donc plus uniquement corpusculaire, mais en partie ondulatoire ! Cette théorie corpusculaire qui fait appel aux ondes de vibrations dans l'éther recèle de nombreuses contradictions. C'est une des raisons du retard de sa publication. Une autre raison est le désir de Newton d'éviter des controverses inutiles en publiant sa théorie après la mort de ses adversaires (Huygens, Hooke), contre qui il était engagé dans de féroces polémiques. Newton était émotivement très attaché à sa théorie et refusait d'en dévoiler clairement les faiblesses, même s'il les percevait lui-même. Ici se révèle une facette sombre de la personnalité de Newton : en dépit de son immense talent, il n'arrive pas à se distancer de ses propres théories et il porte une grande part de responsabilité dans les querelles scientifiques qui l'opposèrent à beaucoup de gens pendant toute sa carrière.³

³Pour une analyse de la personnalité de Newton, cf. [48], pp 146-148.

5.1.4 La théorie ondulatoire de Huygens

L'essentiel des contributions de Huygens en Optique figure dans son *Traité de la lumière*, publié en 1690, mais rédigé avant 1678. Premièrement, Huygens rejette la théorie corpusculaire de la lumière car il ne peut concevoir que ces corpuscules n'entrent jamais en collision avec le reste de la matière ou entre eux ; bref, il ne peut comprendre la propagation rectiligne de la lumière à l'aide de corpuscules qui devraient être constamment déviés. Huygens procède ensuite par analogie avec les ondes sonores et les vagues sur l'eau et propose que la lumière est une *onde* qui se propage dans un milieu (l'éther) qui remplit tout l'espace. Comme dans une onde sonore, les particules du milieu, individuellement, ne se déplacent pas appréciablement, mais toutes ensemble elles supportent un mouvement collectif qui se propage en ligne droite. Il est clair que Huygens est ici l'héritier de Descartes – qui voit la lumière comme une pression qui se propage – mais Huygens a délivré cette conception cartésienne des contradictions internes dont l'avait encombré son auteur en l'assujettissant aux lois des chocs.

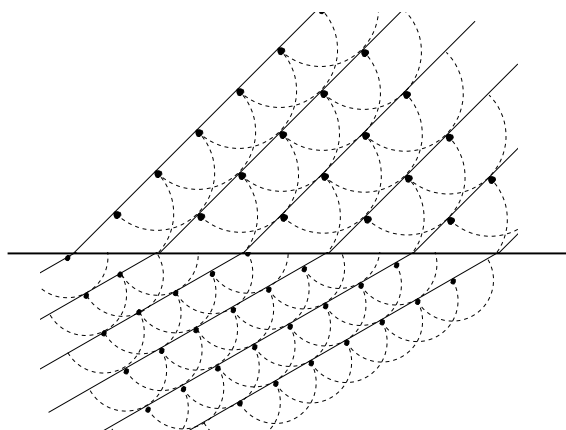


FIG. 5.3 : Illustration du principe de Huygens expliquant la propagation rectiligne d'une onde et sa réfraction.

Huygens précise la façon dont une onde se propage de la manière suivante (cf. Fig. 5.3). À chaque point d'une onde, le milieu est agité en tous sens et chaque point émet à son tour un ondelette dont il est le centre. Les mouvements de toutes ces ondelettes s'additionnent et l'onde, un instant plus tard, se trouve sur l'*enveloppe* de toutes les ondelettes, qui forme une droite dans un milieu homogène. Cette droite est en fait le *front d'onde*, perpendiculaire à la direction de propagation. Ce principe permet facilement d'expliquer la loi de Snell-Descartes, si on suppose que la vitesse de la lumière est inférieure dans les milieux plus denses, comme le supposait Fermat. En effet, les ondelettes se propagent alors moins vite dans le milieu plus dense, ce qui fait dévier l'enveloppe des ondelettes dans la direction du rayon réfracté. Huygens parvient aussi à expliquer les mirages et autres effets se produisant lorsque la densité de l'air varie beaucoup en fonction de l'altitude. Dans ce cas, les fronts d'onde ne sont plus des droites mais des surfaces courbes et la lumière ne se propage plus de manière rectiligne. Tout cela s'explique facilement à l'aide de son principe de propagation.

Le principe de Huygens est encore à la base de l'optique aujourd'hui, même si nos conceptions de la lumière se sont grandement raffinées depuis son époque. Son expression mathématique n'a cependant pas été obtenue par Huygens : c'est Kirchhoff qui la formulera au milieu du XIXe siècle. Malheureusement, Huygens manque le principal : il ne devine pas que les différentes couleurs correspondent à des longueurs d'ondes différentes. Il n'explique pas non plus le phénomène de diffraction, en raison des carences mathématiques de l'époque. En dépit de l'élégance de la théorie de Huygens, c'est la théorie de Newton qui sera adoptée

pendant tout le XVIII^e siècle, en raison surtout de l'immense prestige de Newton et de sa mécanique.

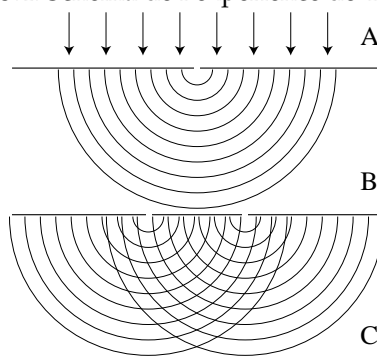
5.1.5 Nouveaux phénomènes et affirmation de la théorie ondulatoire

La biréfringence En 1669, Érasme BARTHOLIN (1625/1698), savant danois, décrit dans un traité les merveilleuses propriétés du spath d'Islande (calcite), un cristal qu'on trouve dans les contrées nordiques et qui fait subir à un rayon lumineux une *double réfraction* : le rayon, lorsqu'il pénètre dans le cristal, se divise en deux rayons, réfractés à des angles différents. Ainsi, l'image qu'on observe à travers un tel cristal est dédoublée. Cette propriété de *biréfringence*, Newton et Huygens tentent de l'expliquer à l'aide de leurs théories, Newton avec moins de succès que Huygens. Ce dernier suppose que deux types d'ondelettes sont émises en chaque point : une ondelette résultant du seul mouvement de l'éther et une autre résultant du mouvement de l'éther combiné à celui des particules microscopiques du cristal. Les premières donnent naissance au rayon *ordinaire* et les deuxièmes au rayon dit *extraordinaire*. Il n'empêche que la lumière apparaît comme un phénomène un peu plus compliqué qu'on ne le croyait d'abord !

La polarisation Au début du XIX^e siècle, on s'intéresse de nouveau à la biréfringence. L'Institut de France promet un prix à celui qui réussira à produire une théorie mathématique de la double réfraction qui soit "vérifiée par l'expérience". Étienne Louis MALUS (1775/1812) reprend les expériences de Huygens sur la combinaison de deux cristaux de calcite et s'aperçoit que le rayon qui pénètre dans le deuxième cristal ne se dédouble pas si les deux cristaux ont la même orientation ! Il découvre aussi que lorsqu'un rayon réfléchi au préalable par une vitre traverse le cristal de calcite, les deux rayons réfractés disparaissent tour à tour lorsqu'on fait tourner le cristal. Ceci est incompréhensible dans la théorie de Huygens (version XVII^e siècle) où la lumière est considérée comme une onde de compression. Malus retourne donc à une théorie corpusculaire et suppose que les particules de lumière ont une certaine orientation propre appelée *polarisation*. Les rayons ordinaire et extraordinaire ont des polarisations différentes et des vitesses différentes. Malus reçoit le prix de l'Institut.

Thomas Young et les interférences Thomas YOUNG (1773/1829) était un homme supérieurement intelligent et un esprit éclectique : il parlait plusieurs langues anciennes et s'attaqua au déchiffrement des hiéroglyphes égyptiens. Sa profession de médecin ne l'empêcha pas d'apporter des contributions cruciales à la physique. Son principal mérite est d'avoir réalisé une expérience démontrant que la lumière est hors de tout doute une *onde* (cf. Fig. 5.4) : il fait traverser à un faisceau de lumière une petite ouverture pratiquée dans un premier écran (A). De l'autre côté de A, une onde sphérique est générée en vertu du principe de Huygens. Cette onde traverse deux fentes pratiquées dans un deuxième écran (B) et deux ondes sphériques sont générées, qui se superposent dans cette région, de manière parfois constructive, parfois destructive et l'intensité lumineuse observée sur l'écran C n'est pas partout la même : on observe en fait des franges colorées (franges d'interférences).

FIG. 5.4: Schéma de l'expérience de Young.



Young interprète correctement les franges colorées en attribuant aux différentes couleurs des longueurs

d'ondes différentes. Si on réalisait son expérience avec une seule couleur, les franges d'interférence seraient très nettes. Young donne aussi une nouvelle explication, correcte cette fois, au phénomène des anneaux de Newton et aux couleurs observées sur les films minces, comme les bulles de savon. Notons que la présence du premier écran (A) dans l'expérience de Young est essentielle, sinon le phénomène d'interférence disparaît : la lumière donnant naissance aux ondes qui interfèrent doit provenir d'une seule source (en termes techniques, elle doit être *cohérente*). Ceci est vrai pour toutes les expériences d'interférence et de diffraction.

Fresnel Augustin FRESNEL (1788/1827) reprend les expériences de Young sans le savoir et découvre les mêmes phénomènes. Fresnel n'a lu ni Huygens, ni Young, ni Malus (il ne lit ni le latin, ni l'anglais et ne peut déchiffrer les travaux de Young qu'on lui envoie). Cependant, il sait très bien calculer et fait ce que Huygens ne pouvait faire : il tire les conclusions mathématiques de la théorie ondulatoire. Il suppose que les ondes lumineuses sont sinusoïdales et arrive à démontrer mathématiquement l'existence des franges d'interférence. Fresnel poursuit ses travaux en collaboration avec François ARAGO (1786/1853), savant beaucoup plus éminent que lui, et réussit à prédire à l'avance, à l'aide de sa théorie, les résultats des nouvelles expériences qu'ils réalisent ensemble.



FIG. 5.5: Augustin FRESNEL (1788/1827)

Ces résultats suscitent une grande controverse entre les partisans (majoritaires) de la théorie corpusculaire de Newton et ceux (moins nombreux) de la théorie ondulatoire. L'Académie des sciences lance un nouveau concours pour étudier la propagation de la lumière à proximité des obstacles (1819) et Fresnel remporte le prix avec un mémoire magistral. Denis POISSON (1781/1840), partisan de la théorie corpusculaire, objecte que, selon la théorie de Fresnel, il devrait y avoir une tache claire au centre de la zone d'ombre causée par un obstacle circulaire, ce qui lui paraît évidemment absurde. L'expérience est faite et la tache claire est observée ! C'est la victoire de la théorie ondulatoire de la lumière. Cependant, plusieurs, dont Poisson, s'entêteront à enseigner la théorie corpusculaire jusqu'à leur mort...

La seule difficulté de la théorie ondulatoire est le problème des polarisations et de la biréfringence. Fresnel observe que deux faisceaux originaires de la même source, dont l'un a vu sa polarisation tournée par un cristal de calcite, ne produisent pas de franges d'interférence (comme si leurs vibrations ne se combinaient pas). Enfin, il propose, changement majeur, que les ondes lumineuses ne sont pas des ondes de compression longitudinales, mais des ondes *transversales*. Les différentes polarisations correspondent alors à des oscillations transversales dans des directions différentes. L'idée originale vient d'André-Marie AMPÈRE (1775/1836). Cela suppose que le milieu de propagation (l'éther) est plus semblable à un solide ou à un gel qu'à un liquide. Étant donnée la vitesse énorme de la lumière (300 000 km/s), ce milieu doit être incroyablement rigide et en même temps incroyablement ténu, puisqu'il ne semble pas interférer avec les autres formes de matière.

Le dernier clou enfoncé dans le cercueil de la théorie newtonienne de la lumière le sera par Hippolyte FIZEAU (1819/1896) et par Léon FOUCAULT (1819/1868) qui les premiers, indépendamment, effectueront une mesure terrestre de la vitesse de la lumière, en 1850. Ces mesures démontrent que la vitesse de la lumière dans l'eau est inférieure à la vitesse dans l'air, contrairement à la théorie corpusculaire et en accord

avec la théorie ondulatoire.

5.2 L'électricité et le magnétisme

5.2.1 Les observations qualitatives

Les phénomènes électriques et magnétiques sont connus de la plus haute antiquité. Les Grecs (Thalès) avaient déjà remarqué que l'ambre (*ēlektron* [ἤλεκτρον]) attire les corps légers après avoir été frotté. D'autre part, ils connaissaient une espèce de pierre, associée à la ville de Magnésie, en Ionie, qui avait la vertu d'attirer les petits morceaux de fer. Ils appelèrent cette pierre magnès (μαγνή), qui signifie "de Magnésie". Plus tard, au moyen-âge, cette pierre fut appelée aimant, du grec *adamas* (ἀδάμας), qui veut dire "acier". Ces deux phénomènes, celui de l'ambre (ou électrique) et celui de l'aimant (ou magnétique) furent souvent confondus, car ils consistaient tous les deux en une attraction, une force exercée à distance, chose très mystérieuse à une époque où on ne concevait naturellement que des forces de contact.

Les phénomènes électriques ne seront pas vraiment étudiés avant le XVII^e siècle. Par contre, on écrira beaucoup plus sur les phénomènes magnétiques, en raison de leur rôle dans le fonctionnement de la *boussole*. Celle-ci, dans sa version primitive, était une pierre d'aimant en forme d'aiguille flottant sur l'eau et s'orientant d'elle-même vers le nord. L'invention est due aux chinois, qui la transmirent aux Arabes, et ces derniers aux Occidentaux. Au siècle de la scolastique, le Français Pierre de MARICOURT (en latin, Petrus Peregrinus), étudia les propriétés de l'aimant (*Epistola de Magnete*, 1269). En particulier, il expliqua comment identifier les pôles nord et sud d'un aimant. Il affirma qu'un aimant brisé en deux ne donne pas un pôle nord et un pôle sud séparés, mais deux nouveaux aimants avec deux pôles opposés chacun. Il expliqua l'orientation de la boussole par la présence de gisements magnétiques au pôle nord. Il ignorait cependant la différence entre le pôle nord magnétique terrestre et le pôle géographique (il est possible que les deux coïncidaient en apparence, de son point de vue, à son époque). Plus important encore, Maricourt insista sur la nécessité pour un savant de connaître les arts manuels et de mener des expériences. Roger Bacon dit de lui :

Je connais un homme – et un seul – dont on puisse faire l'éloge pour ses découvertes. Ce que les autres ne voient avec effort que vaguement et obscurément comme des chauves-souris au crépuscule, lui le voit au grand jour parce qu'il est le maître des expériences. Il a honte d'ignorer des choses que connaissent des illettrés, des vieilles femmes, des soldats ou des laboureurs.

L'influence de Maricourt se fait sentir dans l'oeuvre la plus connue sur les aimants à l'époque de la révolution scientifique : *De Magnete* (1601), de l'Anglais William GILBERT (1544/1603). Alors que Maricourt compare la pierre d'aimant à la sphère céleste, Gilbert la considère plutôt comme la matière terrestre par excellence et propose que la Terre elle-même est un gigantesque aimant. Les deux proposent de tailler la pierre d'aimant en forme de sphère, en analogie avec la sphère céleste (Maricourt) ou avec la Terre (Gilbert). Gilbert discute aussi des phénomènes électriques et découvre que beaucoup de substances peuvent être "électrisées", pas seulement l'ambre. Descartes traite aussi du magnétisme, mais à l'image du reste de son oeuvre, c'est-à-dire en pure imagination et de façon qualitative. Il imagine des "effluves" passant à travers les pores de la matière, etc.

Machines électrostatiques La première machine électrostatique est construite par l'Allemand Otto von GUERICKE (1602/1686) qui fut aussi maire de Magdebourg. Dans son *Experimenta nova* (1672), il décrit comment il a construit une sphère de soufre de la taille d'une tête d'enfant, qu'il a embrochée sur une manivelle et placée sur des supports. Il la fait tourner en la frottant à un tissu et parvient à l'électriser considérablement. Il observe non seulement qu'elle attire les petits objets, mais qu'une fois en contact, ceux-ci sont violemment repoussés par la sphère, jusqu'à ce qu'ils entrent en contact avec d'autres objets. En langage moderne, la sphère de soufre chargée attire les objets neutres par polarisation induite, leur donne une partie de sa charge quand ils entrent en contact avec elle et les repousse ensuite parce qu'ils ont des charges de même signe. Guericke est influencé par Gilbert : il adopte une forme sphérique en analogie avec la Terre et choisit peut-être le soufre en raison de son caractère "magique".

Les machines électrostatiques sont perfectionnées au XVIII^e siècle, notamment par l'Anglais HAUKSBEE.

Une autre innovation technique importante est la *bouteille de Leyde*, la première forme du condensateur. Ce dispositif est mis au point accidentellement par le Hollandais Petrus van MUSSCHENBROEK (1692/1761), qui cherche à emprisonner l'électricité dans une bouteille remplie d'eau et reçoit par mégarde un violent choc électrique ! La bouteille est ensuite raffinée : on ne fait qu'interposer une bouteille de verre entre deux plaques métalliques cylindriques, une à l'intérieur, l'autre à l'extérieur. Les chocs électriques causés par la décharge des bouteilles de Leyde seront une source inépuisable de divertissement dans la deuxième moitié du XVIIIe siècle. À Versailles, devant le roi, on donne un choc violent à 240 soldats (une compagnie complète des gardes) qui se tiennent par la main !

Une ou deux électricités ? Le XVIIIe siècle sera fécond en observations qualitatives sur les phénomènes électriques. En 1729, l'Anglais Stephen GRAY (v.1670/1736) distingue deux types de matériaux : *conducteurs* et *isolants*. Le verre, la résine et la soie sont des isolants ; le bois, le chanvre, les métaux sont des conducteurs, comme l'être humain d'ailleurs : Gray suspend un enfant par des cordes de soie, l'électrise et constate que l'enfant attire les petits objets (fétus). Le Français Charles DU FAY (1698/1739) pousse plus loin ces travaux. Il montre que le bois et le chanvre ne sont conducteurs qu'en raison de l'eau qu'ils contiennent. Il montre qu'un objet conducteur peut être électrisé, à condition d'être suspendu par un isolant. Plus important, il distingue deux types d'électricités : l'électricité *vitrée* et l'électricité *résineuse*, qui sont en langage moderne les charges positive et négative. Il montre que des objets chargés de la même électricité se repoussent alors que ceux chargés d'électricités différentes s'attirent. Lors d'une expérience dans laquelle il est lui-même suspendu par des cordes de soie, il est chargé par une machine électrostatique et ensuite déchargé par une longue étincelle qui jaillit de son corps !

Au contraire de Du Fay, l'Américain Benjamin FRANKLIN (1706/1790) propose qu'il n'y a qu'une sorte de fluide électrique, dont tout corps possède une quantité équilibrée. Ce sont les surplus et les déficits de ce fluide qui constituent les électricités vitrée et résineuse. Après Franklin, on remplacera les mots "vitrée" et "résineuse" par "positive" et "négative" pour qualifier l'électricité. Franklin est aussi l'inventeur du *paratonnerre* : il comprit que la foudre n'est qu'une décharge de l'électricité de l'atmosphère et qu'il est préférable de canaliser cette décharge vers le sol au moyen d'une pointe métallique et d'un long fil conducteur, évitant ainsi à une construction de faire office de (mauvais) conducteur et de risquer l'incendie.⁴

Le reste du siècle verra se populariser ces expériences amusantes dans les salons aristocratiques. On en conclura aussi que le corps humain possède des vertus électriques et magnétiques et certains essaieront de contrôler ces vertus. Un certain Franz Anton MESMER (1734/1815) prétendait pouvoir guérir les maladies en contrôlant le magnétisme humain. Le verbe "magnétiser" (en anglais : *to mesmerize*) est synonyme d'"hypnotiser", de "fasciner". On croyait à l'époque que la personne en état d'hypnose échangeait un "fluide magnétique" avec l'hypnotiseur.

Galvani et Volta À la fin du XVIIIe siècle l'Italien Luigi GALVANI (1737/1798) fait une découverte remarquable et tout à fait accidentelle : ayant disséqué une grenouille sur la même table qu'une machine électrostatique en marche, il constate que les muscles de la grenouille morte se contractent violemment lorsqu'un scalpel entre en contact avec les nerfs, au moment où la machine se décharge. Ceci ne fait qu'ajouter de l'eau au moulin des partisans de l'électricité animale. Galvani répète ses expériences de multiples façons, par exemple en suspendant la grenouille à un crochet de cuivre relié à un paratonnerre. Un jour de beau temps, comme l'orage ne vient pas, il suspend le crochet de cuivre à un balcon de fer et les contractions reprennent de plus belle : Galvani vient de découvrir la pile électrique sans le savoir ! Comme quoi les découvertes importantes sont très souvent fortuites. . .

C'est Alessandro VOLTA (1745/1827) qui est le véritable inventeur de la pile électrique (1800). Volta s'oppose aux idées de Galvani sur l'origine animale de l'électricité et prétend qu'elle vient du contact des deux métaux différents (cuivre et fer ou argent et zinc). Il construit une colonne de disques de zinc intercalés avec des disques d'argents, tous les disques séparés les uns des autres par des morceaux de drap mouillé. Ce dispositif produit de l'électricité en surabondance, beaucoup plus que ce que les anciennes machines élec-

⁴Certains, à l'encontre de Franklin, croyaient qu'il était préférable que les paratonnerres aient des extrémités sphériques et non pointues (ce qui est faux). On raconte que le roi d'Angleterre George III, après la déclaration d'indépendance des États-Unis (1776), fit remplacer les paratonnerres en pointe de ses châteaux par des paratonnerres à extrémité sphériques, parce que Franklin faisait partie des rebelles !

trostatiques peuvent produire.⁵ Cette capacité de produire de grandes quantités d'électricité provoquera une explosion de la science au XIXe siècle car elle permet de produire des courants électriques continus. Elle ouvre la porte à l'électrolyse et à l'électromagnétisme proprement dit.

5.2.2 Les lois mathématiques de l'électricité et du magnétisme

Depuis Galilée et Newton, on sait que les mathématiques peuvent préciser énormément le contenu d'une théorie scientifique et lui donner un pouvoir prédictif. C'est l'Anglais Joseph PRIESTLEY (1733/1804) qui suppose le premier que la force électrique diminue comme l'inverse du carré de la distance, comme la force de gravité. Il le fait plus par analogie avec les travaux de Newton que par déduction expérimentale. C'est à Charles-Augustin COULOMB (1736/1806) que revient le mérite de démontrer expérimentalement ce qu'on appelle la *loi de Coulomb*, en 1785, à l'aide d'une balance à torsion très sensible qu'il a contruite : la force mutuelle entre deux objets chargés est proportionnelle au produit de leur charge (positive ou négative) et inversement proportionnelle au carré de la distance qui les sépare :

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (k \text{ est une constante}) \quad (5.3)$$

Préfigurant le positivisme, Coulomb affirme que "toute hypothèse d'attraction et de répulsion ne doit être regardée que comme une formule qui exprime un résultat d'expérience".

La notion de *potentiel*, introduite pour la gravitation par LAGRANGE en 1772, permet de représenter de manière plus commode les forces en fonction de la distance. Le potentiel gravitationnel créé par un ensemble d'objets est étudié par LAPLACE en 1782 et plus tard par POISSON. Cette notion sera immédiatement utilisée pour décrire la force électrique. L'*électrostatique*, l'étude des forces électriques entre des objets chargés stationnaires, est alors dans sa forme achevée du point de vue des principes.

L'oeuvre d'Ampère On savait depuis le début du XVIIIe siècle que le fer pouvait être aimanté par la foudre et qu'il y avait donc une relation entre l'électricité et le magnétisme. Or, en 1820, le Danois Christian OERSTED (1777/1851) découvre que le courant électrique en provenance d'une pile dévie une boussole placée à proximité. Oersted ne tente pas de quantifier sa découverte ; c'est André-Marie AMPÈRE (1775/1836) qui le fera. Une semaine après avoir entendu une description des travaux d'Oersted, il a déjà complété l'essentiel de la théorie de l'électrodynamique, c'est-à-dire des phénomènes impliquant des courants électriques. Il procède à plusieurs expériences avec l'aide de Fresnel et réussit à exprimer les phénomènes magnétiques à l'aide de phénomènes électriques (c'est-à-dire de courants électriques et de forces sur des fils les portant). Il montre qu'un aimant équivaut à une bobine de fil dans laquelle passe un courant (solenéide). Il décrit la force magnétique entre deux fils dans lesquels circulent des courants, comment cette force varie en fonction de la distance entre les fils et du sens des courants, etc. Il fait même l'hypothèse, en avance sur son temps, que les propriétés magnétiques des matériaux proviennent de ce que les molécules portent une boucle de courant microscopique. Il publie l'ensemble de ses découvertes dans sa *Théorie mathématique des phénomènes électrodynamiques, uniquement déduite de l'expérience* (1827). Ampère observe même le phénomène de l'induction (courant induit dans un circuit par la variation du champ magnétique qui le traverse) mais ne songe pas à l'analyser en détail. Les découvertes d'Ampère lui vaudront le surnom de "Newton de l'électricité", donné par Maxwell. L'un des à-côtés des travaux d'Ampère est la découverte, par Arago, de l'aimantation du fer par un courant et son invention de l'*électroaimant* en 1820.

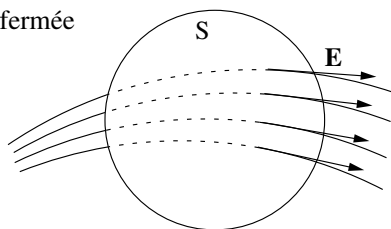
5.2.3 Faraday et Maxwell

La découverte manquée d'Ampère, l'induction, n'allait pas être manquée par l'Anglais Michael FARADAY (1791/1867), sans doute l'une des figures les plus sympathiques de l'histoire des sciences. Le jeune Faraday était apprenti relieur quand il fit une chose qui ne devait pas plaire à son employeur : il se mit à lire les livres qu'il reliait, en particulier les livres de science ! Il fréquenta les conférences scientifiques de la *Royal*

⁵Le mot français *pile* provient des empilements de Volta. Plus tard, on utilisera plutôt des flacons dans lesquels trempent des métaux, reliés en série comme une batterie, d'où le mot anglais *battery* pour désigner une pile électrique.

Les lois de l'électromagnétisme

surface fermée



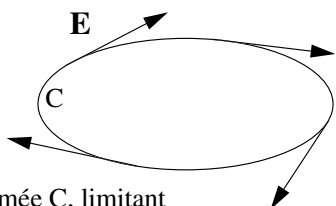
$$\Phi_E = \int_S \mathbf{da} \cdot \mathbf{E}$$

Flux électrique Φ_E : intégrale sur une surface de la composante du champ électrique perpendiculaire à cette surface.

$$C_E = \oint_C \mathbf{dl} \cdot \mathbf{E}$$

Circulation électrique C_E : intégrale le long d'une courbe fermée de la composante du champ électrique parallèle à cette courbe.

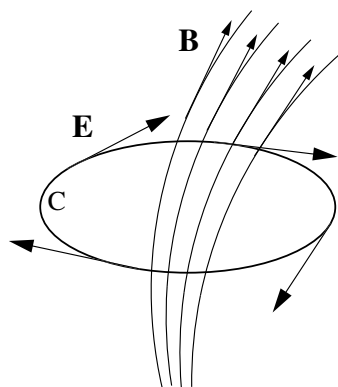
courbe fermée C, limitant une surface S



$$\Phi_B = \int_S \mathbf{da} \cdot \mathbf{B} \quad \text{flux magnétique}$$

$$C_B = \oint_C \mathbf{dl} \cdot \mathbf{B} \quad \text{circulation magnétique}$$

Induction : La variation dans le temps du flux magnétique au travers d'une surface S non fermée induit une circulation électrique (force électromotrice) le long de la courbe C qui borde S. La force électromotrice cause un courant qui à son tour crée un champ magnétique qui a tendance à s'opposer à la variation de flux magnétique.



Équations de **Maxwell** :

Loi de Gauss	$\Phi_E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} Q_{\text{int}}$	surfaces fermées
Absence de monopole magnétique	$\Phi_B = 0$	
Loi de Faraday (induction)	$C_E = - \frac{\partial \Phi_B}{\partial t}$	
Loi d'Ampère	$C_B = + \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \Phi_E}{\partial t} + \mu_0 I$	

Q_{int} : charge électrique totale à l'intérieur de la surface fermée.

I : courant électrique passant au travers de la courbe C.

FIG. 5.6: Les lois de l'électromagnétisme (équations de Maxwell).

Institution de Londres, données par Humphry DAVY (1778/1829), prit des notes précises et en envoya une copie (reliée !) à Davy dans l'espoir que celui-ci lui donne une place d'assistant, ce qu'il fit. Faraday devint plus tard directeur de la *Royal Institution* et joua un rôle très important de vulgarisateur scientifique en donnant régulièrement des conférences destinées au grand public. Même s'il est surtout connu pour ses travaux en électromagnétisme, Faraday réalisa aussi d'importantes découvertes en chimie (développement de l'électrolyse, découverte du benzène, etc.).

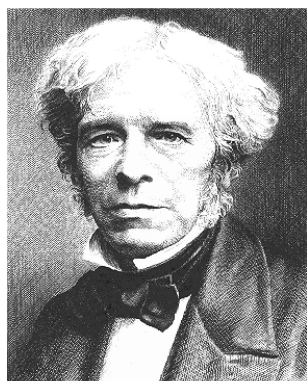


FIG. 5.7: Michael FARADAY (1791/1867) et James Clerk MAXWELL (1831/1879)

La découverte principale de Faraday est l'*induction électromagnétique* : le fait qu'un flux magnétique variable induise un courant électrique dans une boucle de fil fermée. Ainsi, non seulement l'électricité en mouvement peut-elle produire un flux magnétique, mais l'inverse est vrai aussi. Faraday n'était pas mathématicien et ne formalisa pas ses découvertes autant qu'elles auraient pu l'être. Il utilisa cependant les notions de *champ magnétique* et de *champ électrique*, les concevant comme des lignes de force qui s'étendent dans l'espace.

C'est l'Écossais James Clerk MAXWELL (1831/1879) qui prolongea les travaux de Faraday sur les fondements de l'électromagnétisme et les décrivit en termes mathématiques. Il synthétisa toutes les lois de l'électromagnétisme en un tout cohérent dans son article *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field* (1864) et les expliqua plus en détail dans *A Treatise on Electricity and Magnetism* (1873), un ouvrage encore utilisable aujourd'hui, en dépit d'une notation un peu vieillotte. Maxwell dut introduire la notion de *courant de déplacement* pour que l'ensemble des lois mathématiques de l'électricité et du magnétisme ne soient pas en contradiction avec la conservation de la quantité de charge électrique. Toutes ces lois peuvent alors être exprimées sous la forme d'équations appelées *équations de Maxwell* et forment la base de l'électromagnétisme tel qu'il est encore enseigné aujourd'hui.

Maxwell, dans son cheminement vers la synthèse de l'électromagnétisme, utilisa au départ un modèle mécanique (1861), dans lequel les phénomènes électromagnétiques étaient vus comme des écoulements et des tourbillons dans l'éther. Il s'aperçut ensuite que ce modèle ne servait que de support à son imagination et que l'essence des lois de l'électromagnétisme résidait dans leur description mathématique, c'est-à-dire dans les notions de champs électrique et magnétique et dans les équations qu'il avait rassemblées. Maxwell abandonna alors toute référence à son modèle mécanique, une sage décision étant donné son caractère artificiel et peu fécond. Les lois de l'électromagnétisme prirent alors une tournure plus abstraite et minimale. Le parallèle avec la loi de la gravitation universelle est pertinent : Newton lui aussi se garda de chercher une explication mécaniste à la loi en inverse du carré, en affirmant que cette hypothèse suffisait en soi. Il évita ainsi, contrairement aux cartésiens, d'encombrer sa théorie d'une foule d'hypothèses supplémentaires douteuses et inutiles.

L'une des conséquences de la théorie de Maxwell est que les champs électromagnétiques peuvent s'influencer les uns les autres même quand aucune charge ou courant électrique n'est présent. Autrement dit, les champs électromagnétiques ont une *dynamique propre*, indépendante de la matière. Il ressort immédiate-

ment des équations de Maxwell que l'influence mutuelle des champs électriques et magnétiques se propage de proche en proche, comme une onde, à la vitesse $c = 1/\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}$. Notons tout de suite que la forme précise des équations de Maxwell ne prend pas toujours la forme indiquée sur la planche 5.6 : selon les systèmes d'unité utilisés, cette vitesse c peut être cachée (comme ici) ou explicite. Mais cette vitesse apparaît de toute manière quand on mesure une charge électrique de deux façons : d'une part en utilisant la force produite par la charge à l'aide de la loi de Coulomb, d'autre part en mesurant l'effet de cette charge sur une "boussole" quand on la fait circuler dans un fil. Deux chercheurs allemands, KOHLRAUSCH et WEBER, effectuent ces deux mesures et le rapport entre les deux, dans les unités de l'époque, donne précisément cette vitesse c qui hante les lois de l'électromagnétisme. Ils trouvent $c = 3,107 \times 10^8 \text{ m/s}$, résultat étrangement proche de celui de Fizeau pour la vitesse de la lumière : $3,14 \times 10^8 \text{ m/s}$. Maxwell conclut que la lumière est un phénomène électromagnétique : une *onde électromagnétique*. Pour lui, le mystère de la nature de la lumière est résolu : la lumière n'est qu'une oscillation de champs électrique et magnétique s'influençant mutuellement par la loi de l'induction et la loi d'Ampère, telles que décrites par les équations de Maxwell. L'onde électromagnétique est une oscillation transversale, car les champs \mathbf{E} et \mathbf{B} sont perpendiculaires à la direction de propagation et peuvent ainsi prendre deux directions différentes, ce qui explique la polarisation de la lumière. De plus, la nature électromagnétique de la lumière explique les expériences de Faraday sur l'effet d'un champ magnétique sur la polarisation de la lumière.⁶

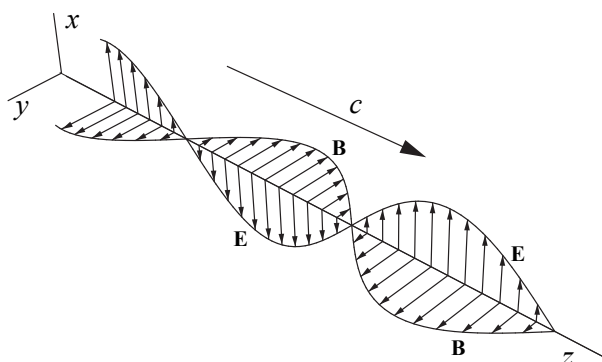


FIG. 5.8 : Configuration des champs électrique et magnétique dans une onde électromagnétique monochromatique à polarisation linéaire.

La théorie électromagnétique de la lumière n'est qu'une théorie tant et aussi longtemps qu'on n'a pas produit des ondes électromagnétiques à l'aide de dispositifs électriques. C'est ce qu'accomplit l'Allemand Heinrich HERTZ (1857/1894) en 1888. Il produit des ondes électromagnétiques à l'aide d'un *émetteur* produisant une décharge électrique (une étincelle). Le *détecteur* est une boucle de fil située à proximité, dans laquelle apparaît une force électromotrice lorsque l'onde la traverse. Hertz parvient à confirmer que la vitesse de ces ondes est bien celle de la lumière ; il parvient à faire réfléchir ces ondes sur certaines surfaces, à les polariser, etc.

5.2.4 Électromagnétisme et technologie

La découverte des lois de l'électricité et du magnétisme ouvre la voie à une incroyable quantité d'applications pratiques. Déjà dans les années 1820, Faraday met au point un dispositif, qu'il montre à Ampère et qui préfigure les moteurs électriques. On perfectionne plus tard les moteurs électriques à brosse qui utilisent un courant pour faire tourner une partie mobile. À l'inverse, l'induction permet de produire un courant à l'aide d'une force mécanique : c'est l'invention de la *dynamo* par Zénobe GRAMME, en 1869. On peut dès lors produire un courant électrique sans l'aide d'une pile. L'électricité devient un moyen extrêmement commode de transporter l'énergie, sans intermédiaire mécanique, surtout après l'invention du moteur à induction et du

⁶Un champ magnétique appliqué parallèlement à un faisceau lumineux se propageant dans un milieu en fait tourner la polarisation dans l'espace. Le degré de rotation dépend de l'intensité du champ magnétique et du milieu utilisé.

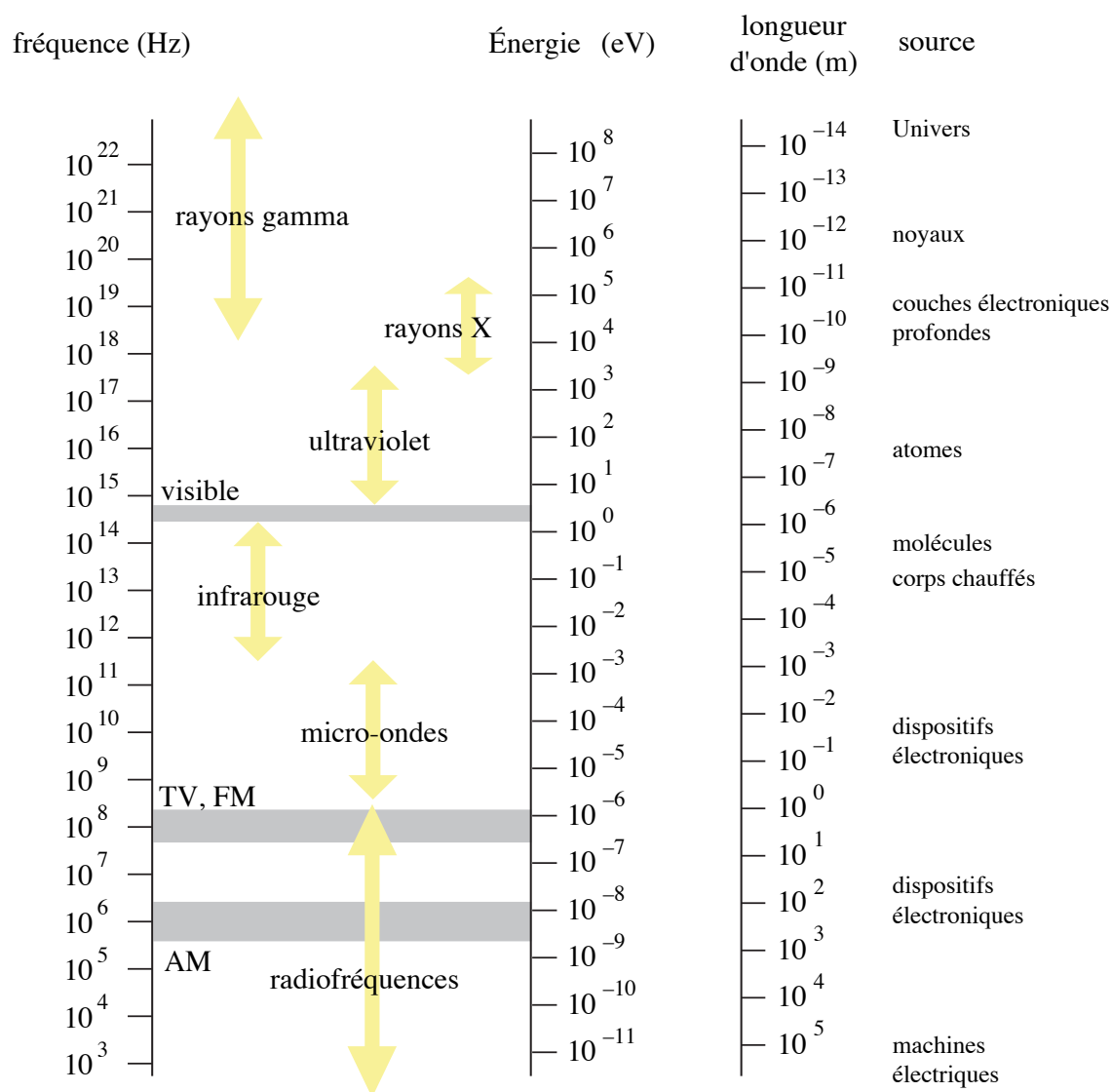


FIG. 5.9: Le spectre électromagnétique.

courant alternatif triphasé par le Croate NICOLAS TESLA (1857/1943) dans les années 1880. Avant ces développements, la mécanisation du travail procédait d'une force motrice produite par des machines à vapeur et transmises par des courroies aux différentes machines d'une usine. Outre les dangers évidents d'une telle pratique, elle ne permettait pas de transmettre l'énergie à de grandes distances et était peu efficace. Les appareils électriques vont changer tout cela et révolutionner les pratiques industrielles et domestiques : c'est la *deuxième révolution industrielle*. Outre ses applications dans la transmission et la conversion d'énergie, l'électromagnétisme va révolutionner le monde des communications, avec l'invention de la télégraphie (la pose de câbles sous-marins intercontinentaux, etc.) et, plus tard, l'invention de la télégraphie sans fil (T.S.F.), qui deviendra la radio, par Guglielmo MARCONI (1874/1937) et Nicolas Tesla. Il ne s'agit pas ici de faire l'histoire de la technologie, mais de remarquer que tous les bienfaits matériels que les humains ont retirés de la technologie électrique ont leur origine dans l'étude méthodique des phénomènes électriques et magnétiques au début du XIXe siècle, étude à caractère *fondamental* et non *appliqué*.

TAB. 5.1: Les premières années de la radio.

1888	Expériences de H. Hertz sur les ondes électromagnétiques.
1890	Invention du récepteur à limaille par Édouard Branly.
1894	Transmission d'un signal radio sur 30 m par Oliver Lodge. Invention de l'antenne réceptrice par Popov.
1896	Marconi transmet un signal sur 10 km.
1897	Utilisation d'un syntonisateur par O. Lodge. Marconi transmet un signal sur 70 km.
1901	Marconi transmet un signal transatlantique.
1906	Lee DeForest invente la lampe amplificatrice (la triode).

5.3 La relativité restreinte

Newton croyait en un espace *absolu*, c'est-à-dire en un repère fixe dans l'Univers, par rapport auquel on peut mesurer la vitesse absolue d'un objet. Il fait coïncider ce repère avec celui du Soleil et de l'éther. Comme Newton, les partisans d'une théorie ondulatoire de la lumière supposent l'existence de l'éther, milieu subtil et rigide dans lequel se propage la lumière. L'éther est considéré comme un milieu de propagation mécanique, au même titre que l'air pour les ondes sonores. Il y a donc un système de référence particulier, celui de l'éther, qu'on peut considérer en repos absolu. Maxwell admet aussi l'existence d'un tel milieu car il a obtenu les lois de l'électromagnétisme à l'aide d'un modèle mécanique, en dépit du fait que sa théorie mathématique le dispense complètement d'une telle interprétation, qui n'apporte rien de nouveau et ne permet de prédire aucun phénomène particulier, ne serait-ce que l'existence même de l'éther.

L'expérience de Michelson et Morley Si l'éther existe, il devrait être possible de le détecter, par exemple en observant l'effet Doppler associé au mouvement d'une source et d'un récepteur fixes sur la Terre. C'est ce qu'entreprennent les physiciens américains A.A. MICHELSON et E.W. MORLEY. Dans leur célèbre expérience, réalisée en 1887 et perfectionnée par la suite, un faisceau de lumière est divisé, puis recombinaison et interfère avec lui-même. Si la Terre se déplace par rapport à l'éther, le patron d'interférence doit être modifié quand le dispositif expérimental est tourné de 90° . Or les résultats de l'expérience sont négatifs : il est impossible de détecter le mouvement de la Terre par rapport à l'éther. Toutes sortes d'explications sont avancées : peut-être, par une coïncidence étrange, la Terre était au repos par rapport à l'éther quand l'expérience a été réalisée. Mais les résultats sont les mêmes six mois plus tard et cette explication ne tient pas. Peut-être la Terre entraîne-t-elle avec elle une portion de l'éther dans son mouvement autour du Soleil ; mais alors une déformation des images stellaires devrait être observable. Un physicien irlandais, George Francis FITZGERALD, propose même l'idée que les objets en mouvement à une vitesse v par rapport à l'éther sont

en quelque sorte contractés dans la direction de leur mouvement par un facteur $\sqrt{1 - v^2/c^2}$, ce qui expliquerait l'absence d'effet Doppler dans l'expérience de Michelson et Morley ; mais cette explication est trop artificielle et devrait avoir des conséquences en mécanique qui n'ont pas été observées.

Le principe de relativité Le résultat de l'expérience de Michelson et Morley peut être érigé en principe : le *principe de relativité*, énoncé clairement pour la première fois par le mathématicien français Henri POINCARÉ (1854/1912). Ce principe stipule que l'espace absolu n'existe pas, que seuls les mouvements relatifs entre objets ont un sens physique. Ce principe est entièrement compatible avec la mécanique newtonienne. En effet, le principe d'inertie (ou de Galilée) s'applique par définition dans un *référentiel inertiel* : tout objet sur lequel aucune force ne s'applique conserve son état de mouvement uniforme. Un deuxième référentiel, qui se déplace à une vitesse uniforme par rapport à un référentiel inertiel, est aussi un référentiel inertiel. Les lois de Newton, en particulier $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$, sont applicables en autant qu'on se place dans un référentiel inertiel, mais leur forme est la même dans tous les référentiels inertiels qui se déplacent les uns par rapport aux autres à vitesse constante. Mathématiquement, si on définit les coordonnées cartésiennes (x, y, z) dans un référentiel S et les coordonnées (x', y', z') dans un référentiel S' qui se déplace à la vitesse constante V le long de l'axe des x par rapport à S , alors les coordonnées utilisées dans les deux référentiels sont reliées de la manière suivante :

$$x' = x - Vt \quad y' = y \quad z' = z \quad (5.4)$$

en supposant que les deux systèmes d'axes sont superposés au temps $t = 0$.

Les transformation de Lorentz Les lois de l'électromagnétisme posent un problème à cet égard, car elles font intervenir une vitesse c , interprétée comme la vitesse des ondes électromagnétiques par rapport à l'éther. Si on applique la transformation (5.4) aux équations de Maxwell pour l'électromagnétisme, on trouve que ces équations n'ont plus la même forme dans les deux référentiels. Autrement dit, les lois de l'électromagnétisme semblent incompatibles avec le principe de relativité.

La solution du paradoxe fut l'oeuvre de plus d'un scientifique. Le coupable est la transformation (5.4). Elle doit être modifiée afin que les lois de Maxwell soient les mêmes dans tous les référentiels, ce qui expliquerait naturellement le résultat négatif de l'expérience de Michelson et Morley. La transformation adéquate est la suivante :

$$\begin{aligned} x' &= \frac{x - Vt}{\sqrt{1 - V^2/c^2}} & t' &= \frac{t - Vx/c^2}{\sqrt{1 - V^2/c^2}} \\ y' &= y & z' &= z \end{aligned} \quad (5.5)$$

Elle est a été formulée explicitement par Poincaré en 1904 et généreusement appelée par lui *transformation de Lorentz* pour souligner les contributions essentielles du physicien hollandais Hendrik Anton LORENTZ (1853/1928) à sa formulation.⁷

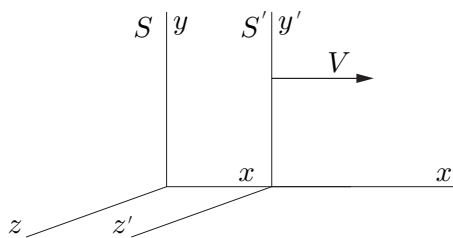


FIG. 5.10 : Schéma de deux référentiels S et S' dont l'origine est la même au temps $t = 0$. S' se déplace par rapport à S le long de l'axe des x , à une vitesse V .

Cette nouvelle loi de transformation a de nombreuses conséquences :

1. Le temps perd son caractère absolu. Deux événements qui sont simultanés dans un référentiel ne sont pas nécessairement simultanés dans un autre référentiel. C'est la *relativité de la simultanéité*.

⁷Cette transformation fut aussi publiée indépendamment dès 1887 par le physicien W. Voigt, sans impact à l'époque.

2. La longueur d'un objet n'est pas la même s'il est au repos que s'il est en mouvement à une vitesse V : il est alors contracté par un facteur $\sqrt{1 - V^2/c^2}$. C'est la *contraction des longueurs*.
3. Une horloge en mouvement à une vitesse V bat moins vite que la même horloge au repos, par un facteur $\sqrt{1 - V^2/c^2}$. C'est la *dilatation du temps*.



FIG. 5.11: Albert EINSTEIN (1879/1955) et Henri POINCARÉ (1854/1912)

Albert Einstein Quoique les fondements philosophiques et mathématiques de la théorie de la relativité restreintes aient été établis au préalable par Poincaré, c'est généralement au physicien allemand Albert EINSTEIN (1879/1955) qu'on attribue la théorie de la relativité. Einstein, alors jeune employé du bureau des brevets de Berne (Suisse), publia en 1905 un mémoire intitulé *Sur l'électrodynamique des corps en mouvement*, dans lequel il formule le principe de relativité et en déduit la transformation de Lorentz. Einstein pousse plus loin des idées déjà formulées par Poincaré et adapte la mécanique de Newton – qui n'est compatible avec la transformation de Lorentz que dans la limite des vitesses petites par rapport à c – pour en faire une véritable mécanique relativiste. Einstein, contrairement à Poincaré, est bien intégré à la communauté des physiciens allemands, la plus influente et importante de l'époque, et publie dans des journaux plus connus des physiciens, comme *Annalen der Physik*. Son ancien professeur de l'école polytechnique fédérale de Zürich, Hermann MINKOWSKI (1864/1909), introduit le concept géométrique d'*espace-temps* en 1908 : le temps absolu et l'espace absolu disparaissent au profit d'un espace-temps absolu. Einstein, par la suite, prolongera la théorie de la relativité pour l'étendre à tous les référentiels, inertiels ou non (relativité générale, 1915). On a cependant tort d'attribuer la théorie de la relativité au seul Einstein.

Relativité et expérience Si les conséquences expérimentalement vérifiables de la théorie de la relativité n'ont pas sauté immédiatement aux yeux, c'est que la vitesse de la lumière est extrêmement grande en comparaison des vitesses usuelles pour lesquelles ces effets sont minuscules. Depuis sa formulation, la théorie de la relativité restreinte a été vérifiée par de nombreuses expériences. La dilatation du temps a été observée lors de la désintégration spontanée de particules subatomiques et même directement mesurée à l'aide d'horloges très précises. Le bon fonctionnement des accélérateurs de particules, dans lesquels des électrons ou des protons circulent à des vitesses voisines de celle de la lumière, est une confirmation continue de la relativité. D'autre part, comme toute théorie fondamentale, la relativité a reçu de nombreuses confirmations indirectes, mais non moins importantes, de la part de théories qui l'ont comme base, telle l'électrodynamique quantique (la théorie quantique de l'électromagnétisme) et la relativité générale (cf. Sect. 9.2). De nos jours, le système de positionnement global (GPS) est basé sur la théorie de la relativité générale et son fonctionnement adéquat et continu est considéré comme une confirmation concrète de la théorie de la relativité restreinte et généralisée.

Équivalence masse-énergie Selon la théorie de la relativité restreinte, la vitesse c n'est pas seulement la vitesse de la lumière, mais aussi la *vitesse limite* au-delà de laquelle nul objet, nulle influence ne peut se propager. Les lois de Newton doivent être modifiées pour tenir compte de ce fait. Cette modification n'invalide pas les nombreuses prédictions effectuées à l'aide de la mécanique newtonienne, car elle n'affecte que les objets qui se déplacent très rapidement, à une fraction appréciable de la vitesse de la lumière. Une consé-

quence de la modification des lois de Newton par ce qu'on appelle maintenant la théorie de la relativité est que la masse, ou l'inertie, peut être considérée comme une forme d'énergie : c'est le célèbre $E = mc^2$, publié par Einstein en 1905, mais dont le mérite revient également à Poincaré qui publia essentiellement le même résultat en 1900 (Einstein reconnaîtra d'ailleurs cette paternité, quoiqu'elle a été largement oubliée).

⁸ Cette nouvelle énergétique sera mise à l'épreuve par la physique nucléaire naissante du début du siècle : nous y reviendrons plus tard.

Signalons aussi que la notion d'action à distance, que détestaient tant les cartésiens, a perdu son sens. La force gravitationnelle ne peut se transmettre instantanément du Soleil à la Terre : elle ne peut le faire qu'à la vitesse de la lumière. La théorie de la relativité nous force à donner une existence vraiment indépendante aux champs électrique et magnétique, ainsi qu'à leur équivalent gravitationnel. Ces champs, qui ne sont pas à proprement parler matériels, servent en quelque sorte d'intermédiaires à l'interaction des objets matériels. On peut même les considérer comme une version moderne et beaucoup plus raffinée de l'*Étendue* (ou *Plenum*) de Descartes. Comme quoi les vieilles idées qu'on croyait dépassées reviennent parfois nous hanter...

Le photon Comme ce chapitre a débuté avec les théories de la lumière, il est juste que nous le terminions de la même manière. Une autre contribution majeure d'Einstein en cette année 1905 (l'une des années fastes de la physique) est son explication de l'*effet photo-électrique*, découvert par Hertz. Rappelons brièvement de quoi il s'agit. Les électrons d'un métal sont liés à celui-ci par une certaine énergie de cohésion W qu'il faut fournir à chaque électron pour l'éjecter du métal. Une façon de procéder à cette éjection est d'éclairer le métal avec un faisceau de lumière. La lumière étant une onde électromagnétique, le champ électrique de cette onde agira sur les électrons et finira par leur fournir l'énergie nécessaire pour s'échapper. En théorie, on peut éclairer le métal avec n'importe quelle couleur et l'effet devrait être le même. Or il n'en est rien : l'expérience montre qu'une fréquence minimum est requise. On peut éclairer le métal avec une lumière très intense, mais de fréquence trop petite (e.g. du rouge) et aucun électron ne s'échappera. Au contraire, une fréquence plus élevée (e.g. du bleu) éjectera des électrons, même si l'intensité est faible (le nombre d'électrons éjectés sera cependant proportionnel à l'intensité de l'éclairement).

L'explication donnée par Einstein à ce phénomène est que la lumière est en fait constituée de grains d'énergie appelés *photons* et que la quantité d'énergie portée par chaque grain est $E = h\nu$, où ν est la fréquence de la lumière et h la constante que Max PLANCK (1858/1947) a dû introduire cinq ans plus tôt dans son explication semi-empirique du rayonnement d'un corps noir. Ainsi, même si les électrons d'un métal reçoivent une grande quantité de photons "rouges", chacun d'entre eux n'a pas l'énergie suffisante pour éjecter l'électron et la probabilité qu'un électron absorbe deux photons en même temps est très faible. Par contre, même une petite quantité de photons "bleus" pourra éjecter des électrons. Évidemment, une telle conception semble en complète contradiction avec la théorie électromagnétique de la lumière. L'explication ne sera complète, cohérente et réconciliée avec la théorie de Maxwell qu'avec la mise au point, par plusieurs physiciens, de la *mécanique quantique*, dans les années 1920.

Il ressort de tout cela que le vieux débat sur la nature corpusculaire ou ondulatoire de la lumière ne peut pas être tranché : la lumière possède à la fois les attributs d'une onde et ceux d'une particule. Les concepts d'onde et de particule ne sont pas exclusifs dans ce cas. Plus précisément, les propriétés ondulatoires sont plus pertinentes pour décrire la *propagation* de la lumière alors que les propriétés corpusculaires ressortent plus des phénomènes d'*absorption* et d'*émission*.

⁸Notons que la formule textuelle $E = mc^2$ n'apparaît nulle part explicitement dans l'article qu'Einstein publia à ce sujet en 1905, ou dans celui de Poincaré en 1900.

Chapitre 6

Chaleur et énergie

6.1 Chaleur et température

La physique d'Aristote considère le *chaud* et le *froid* comme des qualités fondamentales. On ne fait pas vraiment de distinction sérieuse, avant le XVIII^e siècle, entre les notions de chaleur et de température, la température étant en quelque sorte un “degré de froid ou de chaud”, qui se définit essentiellement par les sens. Des notions plus claires à ce sujet pourront émerger suite à la mise au point d'instruments qui permettront d'indiquer un changement observable d'une propriété d'un corps associé à un changement de température, comme par exemple la dilatation d'une colonne de liquide sous l'effet d'un chauffage. Mais, indépendamment des instruments utilisés pour l'évaluer ou la mesurer, la caractéristique fondamentale de la température est qu'elle caractérise l'*équilibre thermique* entre deux objets : deux objets mis en contact thermique (c'est-à-dire qui peuvent échanger de la chaleur) finissent par avoir la même température.

Depuis l'Antiquité, le phénomène de dilatation des solides et des liquides lorsqu'on en élève la température était connu et utilisé dans la construction de *thermoscopes* indiquant le degré de chaleur. Ces instruments permettaient de donner une définition opératoire de la température, obtenue par exemple en mesurant la hauteur du liquide sur une colonne graduée. Le liquide utilisé était principalement de l'esprit de vin, c'est-à-dire un mélange coloré d'alcool et d'eau. Ce mélange jouit d'une bonne dilatation thermique, mais en revanche souffre de fortes variations de ses propriétés thermiques en fonction de sa composition, et la distinction entre mélange et composé n'était pas nécessairement faite avant la fin du XVIII^e siècle. Indépendamment du fluide utilisé, on parle ici de *thermoscopes* et non de *thermomètres*, car on ne disposait pas de procédure infaillible pour imposer une calibration des instruments ; bref, on ne disposait pas d'une véritable échelle de température. On pourra élaborer de véritables échelles de température lorsqu'on aura découvert que la température d'un liquide ou d'un gaz est déterminée par certaines variables comme son volume, la pression, etc. Par exemple, dès qu'on se sera convaincu que l'eau pure, à une pression donnée, bout ou gèle toujours à la même température, on pourra songer à une échelle de température universelle basée sur ces deux points. C'est au XVIII^e siècle que ces échelles de température sont élaborées :

1. L'Allemand Daniel Gabriel FAHRENHEIT (1686/1736) adopta le thermomètre au mercure en 1714, en raison de la composition invariable de celui-ci, comparée à celle de l'alcool : il avait mis au point une technique de purification du mercure (par filtration au travers du cuir). En revanche, le coefficient de dilatation thermique du mercure étant plus faible que celui de l'alcool, il demande un travail du verre beaucoup plus minutieux, afin de réaliser une colonne de liquide beaucoup plus mince. Grâce à son thermomètre plus précis, il put confirmer que la température de l'eau pure en ébullition reste constante au cours du processus, mais qu'elle dépend de la pression atmosphérique. Il adopta comme points de référence de son échelle de température un mélange de sel et de glace (0°) et la température d'un humain en bonne santé (96°).
2. Le Genevois J.-A. DELUC introduisit une échelle de température dont le zéro correspondait à la glace

fondante (à pression normale). La température d'ébullition de l'eau (à pression normale) était fixée à 80°. Cette échelle fut popularisée par le naturaliste français R.A. Ferchault de RÉAUMUR et porta son nom. Elle fut utilisée jusqu'au XIXe siècle.

3. Le Lyonnais J.-P. CHRISTIN introduisit une échelle similaire en 1743, mais avec un point d'ébullition à 100°. Cette échelle fut aussi utilisée par le savant suédois Anders CELSIUS et porte son nom, quoique Celsius inversait le sens de l'échelle : congélation à 100° et ébullition à 0°. Celsius aussi avait noté que la température d'ébullition de l'eau dépend de la pression atmosphérique, et donc que son échelle se définit à une pression standard.¹

La chaleur On observa assez tôt que des objets de masses et températures identiques mais de compositions différentes peuvent faire fondre des quantités différentes de glace. Cette observation est la base de la notion quantitative de chaleur. La chaleur est conçue comme une quantité effective d'action thermique : par exemple, deux quantités de chaleur égales font fondre la même quantité de glace. Si deux billes de métal de masses identiques, l'une de plomb et l'autre de cuivre, sont chauffées à la même température et qu'elles sont ensuite déposées sur une plaque de cire, la bille de cuivre fera fondre une plus grande quantité de cire que la bille de plomb ; elle contient donc plus de chaleur. C'est le physicien et chimiste écossais Joseph BLACK (1728/1799) qui introduisit précisément la notion de *capacité calorifique*, c'est-à-dire la capacité qu'a une substance d'absorber la chaleur. Cette quantité est définie de telle manière que si deux corps de températures T_1 et T_2 et de capacités calorifiques C_1 et C_2 sont mis en contact, la température finale de l'ensemble après l'échange de chaleur est

$$T = \frac{C_1 T_1 + C_2 T_2}{C_1 + C_2} \quad (6.1)$$

On peut aussi lire cette relation comme

$$C_1(T_1 - T) = -C_2(T_2 - T) \quad (6.2)$$

ce qui illustre plus clairement que la chaleur perdue par le premier corps est gagnée par le deuxième.² En bref, la température est une mesure du "degré de chaleur", qu'il faut distinguer de la "quantité de chaleur".

Substance ou mouvement ? Quant à la nature même de la chaleur, deux thèses contraires s'affrontèrent du XVIIe siècle jusqu'au milieu du XIXe siècle. Selon la première thèse, la chaleur est une substance, un fluide subtil qui peut passer d'un corps à un autre. Cette conception fut préconisée par le chimiste hollandais Hermann BOERHAAVE (1668/1738), et partagée par Black et Antoine-Laurent de LAVOISIER (1743/1794). Ce dernier donna à ce fluide le nom de *calorique* et l'ajouta à sa liste des éléments dans son *traité de Chimie*. Considérer la chaleur comme un fluide n'est pas une mauvaise idée *a priori*, étant donné les phénomènes dûment observés de transfert de chaleur d'un objet à un autre. On croyait que la chaleur dégagée par une réaction chimique résultait simplement du dégagement d'une certaine quantité de calorique par les réactants. Après l'hypothèse atomique de Dalton, on croyait même que chaque atome était entouré d'une quantité déterminée de calorique, quantité variant d'un composé chimique à l'autre et pouvant être dégagée lors d'une réaction chimique, ou nécessaire à sa progression, selon le cas.

À la théorie du calorique s'oppose la *théorie dynamique de la chaleur*, qui considère plutôt la chaleur comme un mouvement microscopique. Robert BOYLE (1627/1691), physicien et chimiste irlandais et père fondateur de la *Royal Society* de Londres, est partisan de cette thèse. Boyle base ses opinions sur l'observation que deux morceaux de glace fondent plus vite si on les frotte l'un sur l'autre et donc qu'un mouvement peut générer de la chaleur. Daniel Bernoulli aussi est un partisan de cette thèse, et démontre que le mouvement d'un gaz de particules peut expliquer la pression que ce gaz exerce sur les parois du contenant qui le retient ; Bernoulli est donc l'instigateur de la théorie cinétique des gaz. Pierre-Simon de Laplace, même s'il a réalisé de nombreuses expériences sur la chaleur en collaboration avec Lavoisier, est aussi d'avis que la chaleur est une forme de mouvement microscopique. Au tournant du XIXe siècle, le partisan le plus convaincant

¹L'échelle de température Celsius en usage aujourd'hui est basée sur l'échelle de température absolue et sur le point triple de l'eau. Elle doit être distinguée de l'ancienne échelle centigrade, qui comptait exactement 100 degrés entre les points de fusion et d'ébullition. Dans l'échelle Celsius moderne, l'eau bout à 99,975°, à pression normale.

²En principe, la capacité calorifique d'un corps dépend de sa température. Les équations ci-haut ne sont donc qu'approximatives pour des différences de températures qui ne sont pas infinitésimales.

de la théorie dynamique de la chaleur est l'Américain Benjamin THOMSON, comte RUMFORD (1753/1814). En 1798, il avait observé que l'opération de forage des canons produit beaucoup de chaleur, qui doit être constamment évacuée par circulation d'eau. La théorie du calorique explique le réchauffement par le transfert de calorique du foret au canon (le foret s'use graduellement au cours de l'opération). Mais, comme remarqua Rumford, si on continue de forer avec un foret usé, la chaleur continue d'être produite indéfiniment, alors que la quantité de calorique que recèle le foret ne peut être infinie ! La seule chose qu'on peut générer indéfiniment est le mouvement ! Donc la chaleur est un mouvement et non une substance.

La théorie dynamique de la chaleur ne sera acceptée qu'après les travaux de JOULE sur l'équivalent mécanique de la chaleur, dans les années 1840. Ceci est en partie dû au prestige de Lavoisier, mais aussi au mystère de la *chaleur radiante* : il a été observé par le chimiste Suédois Carl Wilhelm SCHEELE (1742/1786) que la chaleur d'un feu se transmet de manière instantanée dans l'air et passe même au travers d'une paroi de verre. À l'époque, ceci est impossible à comprendre dans le cadre d'une théorie dynamique de la chaleur, car on conçoit mal que ce mouvement microscopique de la matière ordinaire se transmette aussi facilement et rapidement à travers l'air et le verre. Par contre, cette observation s'accommode de la théorie du calorique, si on suppose que ce fluide est suffisamment subtil pour traverser le verre et se propager rapidement. Ce n'est que plus tard qu'on réalisera que la chaleur radiante provient du rayonnement électromagnétique infrarouge.

6.2 Les lois des gaz

Les progrès réalisés au XIXe siècle dans l'étude de la chaleur sont indissociables des progrès techniques réalisés depuis le XVIIIe siècle dans la mise au point de machines susceptibles d'utiliser la chaleur dans le but de produire un travail mécanique. Comme les premières machines à vapeur reposaient sur l'utilisation de la pression atmosphérique pour effectuer un travail, il nous faut effectuer un bref retour en arrière pour relater comment la notion de pesanteur de l'air s'est imposée dans les esprits du XVIIe siècle. L'étude des propriétés des gaz sera par la suite essentielle au développement de la théorie de la chaleur.

6.2.1 La pression atmosphérique

Nous avons vu qu'Aristote niait l'existence du vide, de l'absence de matière. Descartes de même, pour des raisons qui lui paraissaient évidentes à lui seul. Or, dès le milieu du XVIIe siècle, des expériences prouvent clairement que le vide est possible. En fait, les artisans spécialistes des pompes savaient depuis longtemps qu'il est impossible de pomper de l'eau dans un conduit à une hauteur de plus de dix mètres. Or, l'explication classique du fonctionnement des pompes est que "la Nature a horreur du vide" et que l'eau se précipite pour combler le vide créé par le mécanisme de la pompe. Il semble que cette horreur que la Nature éprouve pour le vide ne dépasse pas 10 mètres d'eau ! Galilée, amené vers 1640 à réfléchir à cette question par le grand-duc de Toscane qui n'arrive pas à alimenter les fontaines de son palais à même une source située 13 mètres plus bas, ne peut fournir une explication correcte.

C'est un disciple de Galilée, Evangelista TORRICELLI (1608/1647) qui découvre l'explication : l'eau monte dans un tuyau évacué parce que la pression de l'atmosphère, absente du tuyau, pousse sur l'eau partout ailleurs. L'eau monte jusqu'à ce que la pression hydrostatique à la base de la colonne d'eau soit égale à la pression atmosphérique : elle n'a aucune raison de monter plus haut et le vide existe bel et bien au-dessus. En fait, la pression atmosphérique peut être mesurée en déterminant la hauteur précise de la colonne d'eau. Comme il n'est pas pratique de manipuler un tube de 10 mètres rempli d'eau, Torricelli remplace l'eau par du mercure, beaucoup plus dense, et constate que la colonne de mercure contenue dans un tube inversé ne dépasse pas 76 cm, environ. Le baromètre est né.

L'expérience de Torricelli ne parvient pas à convaincre tout le monde, en particulier les cartésiens. Blaise PASCAL (1623/1662), pensant (correctement) que le poids de l'atmosphère doit être moindre en haut d'une montagne qu'à sa base, demande à F. PÉRIER, qui vit à Clermont, à proximité du Puy-de-Dôme, de reprendre l'expérience de Torricelli (1648). Périer mesure la hauteur de la colonne de mercure à la base du

Puy-de-Dôme et ensuite au sommet (1465 m d'altitude). Il observe une différence de 3 pouces dans le niveau de mercure, ce qui permet de conclure que c'est bien le poids de l'atmosphère qui pousse le mercure dans sa colonne. L'essentiel est que cette différence de trois pouces est plus grande que les fluctuations quotidiennes de la pression atmosphérique en un endroit donné.

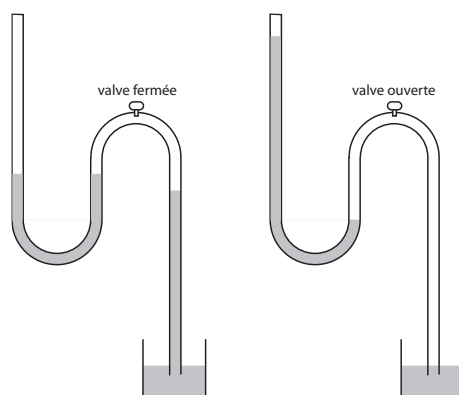


FIG. 6.1 : Schéma du double baromètre. À gauche, la valve est fermée, et le mercure s'élève dans la colonne de droite, mais non dans la colonne de gauche, puisque la pression à l'intérieur du 'S' est nulle. À droite, l'air est introduit dans le coude du 'S', le mercure de la colonne de droite redescend, alors que celui de la colonne de gauche s'élève.

Le rôle de la pression atmosphérique dans la montée du mercure est démontrée hors de tout doute par ROBERVAL la même année, qui parvient ingénieusement à construire un "double baromètre", en forme de 'S'. Voir Fig. 6.1.

Le premier véritable baromètre est construit par Otto von GUERICKE. Il peut ainsi indiquer la pression atmosphérique et (peut-être) prédire le temps qu'il fera ! Guericke est surtout connu pour la célèbre expérience dite des *hémisphères de Magdebourg* : il assemble deux hémisphères de cuivre, séparés par un joint d'étanchéité (du cuir mouillé) et fait le vide à l'intérieur à l'aide d'une pompe de son invention.³ Ensuite, il tente de séparer les deux hémisphères en tirant sur chacun d'eux avec un attelage de huit chevaux de trait, sans succès. Cette expérience publique eut un grand retentissement.

En insérant une cloche à l'intérieur d'un volume partiellement évacué, Guericke remarque que le son s'y propage quand même. Le son, selon lui, est le fruit de la propagation de particules et son passage n'est pas gêné par le vide. Il démontre aussi que l'air est essentiel à la vie en asphyxiant divers animaux dans une enceinte évacuée ou "machine pneumatique".⁴ La machine pneumatique d'Otto von Guericke fut améliorée par plusieurs, en particulier Robert Boyle. Celui-ci affirmera plutôt que le son est une onde qui a besoin d'un milieu pour se propager et que réduire la pression à l'intérieur d'une enceinte atténue sa propagation, sans l'éliminer complètement.

6.2.2 Pression, volume et température

Au milieu du XVII^e siècle, les expériences sur le vide motivent une étude des propriétés élastiques de l'air. En effet, tout vide est imparfait – surtout à cette époque – et ne constitue en fait qu'une baisse de pression à l'intérieur de l'enceinte évacuée. La première question qui se pose porte sur la variation de la pression de l'air en fonction du volume du contenant.

³Le vide parfait est un idéal, bien sûr. Disons que Guericke abaissa considérablement la pression à l'intérieur de la sphère. La technologie du vide n'a pas cessé de progresser depuis.

⁴Un tableau de Joseph Dright de Derby intitulé *Expérience avec la machine pneumatique* illustre une expérience similaire réalisée couramment dans les salons du XVIII^e siècle. On le retrouve en couverture de l'ouvrage de MAURY [51]. On remarquera la délicatesse des femmes et la froide cruauté des hommes sur ce tableau !

La loi de Boyle En 1660, Robert Boyle publie la loi qui porte son nom et qui stipule que le produit du volume par la pression est une constante à température constante :

$$PV = \text{const} \quad (\text{à température constante}) \quad (6.3)$$

La loi de Boyle fut redécouverte indépendamment par le Français Edme MARIOTTE (1620/1684) en 1679.⁵ Décrivons l'expérience simple de Mariotte et voyons comment elle révèle la loi (6.3).

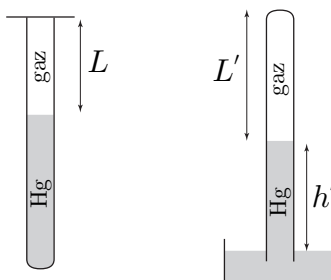


FIG. 6.2 : Schéma de l'expérience de Mariotte. À gauche, un tube est partiellement rempli de mercure et il reste une hauteur L d'air à l'intérieur. À droite, le même tube est retourné dans un bassin de mercure et la hauteur de la colonne d'air est passée de L à L' , alors que celle de la colonne de mercure est h' .

Mariotte remplit partiellement un tube de mercure, en laissant une hauteur L d'air au sommet (cf. Fig. 6.2). Ensuite, il retourne ce tube dans un bassin de mercure, en prenant soin de ne pas laisser échapper l'air. Une fois retourné, le même air occupe un volume plus grand (la hauteur de la colonne d'air est L' et la hauteur de la colonne de mercure est h' , au lieu de $h = 76\text{cmHg}$ si le vide était fait dans la colonne supérieure. On doit attendre un court laps de temps avant de mesurer h' , afin que la température de la colonne d'air, soudainement refroidie, remonte à la valeur de l'environnement. Montrons ce que la relation (6.3) implique pour les valeurs de L , L' , h et h' . Soit P la pression atmosphérique – égale à la pression hydrostatique à la base de la colonne de mercure – et P' la pression dans la colonne d'air du tube renversé. La hauteur d'équilibre h' de la colonne de mercure est alors telle que $P - P' = \rho gh'$, où ρ est la densité du mercure et g est l'accélération gravitationnelle. Au contraire, dans une colonne de mercure évacuée de hauteur h , la relation correspondante est $P = \rho gh = 76\text{cm}$. La relation (6.3) signifie ici que $PV = P'V'$, où V et V' sont les volumes de la colonne d'air avant et après renversement. Comme la section du tube est uniforme, on peut aussi écrire $PL = P'L'$. Mais comme $P = \rho gh$ et $P' = P - \rho gh' = \rho g(h - h')$, on peut exprimer la loi de Boyle comme

$$Lh = L'(h - h') \quad \text{ou encore} \quad \frac{h'}{h} + \frac{L}{L'} = 1 \quad (6.4)$$

C'est cette relation que vérifia Mariotte.

La loi de Charles Une fois que les échelles de température seront bien établies, on pourra s'intéresser à la dilatation des gaz en fonction de la température. Signalons tout d'abord les travaux du Français Jacques CHARLES (1746/1823), qui étudia comment les gaz se dilatent lors d'une augmentation de la température et en arriva à la loi qui porte son nom et qui peut s'écrire

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1 - A}{T_2 - A} \quad (6.5)$$

où V_1 et V_2 sont les volumes d'un gaz à deux températures T_1 et T_2 différentes mais à pression constante. La constante A est directement mesurable. En 1802, Louis-Joseph GAY-LUSSAC (1778/1850) obtient la valeur

⁵En fait, les Anglais Power et Towneley ont obtenu la loi de Boyle avant ce dernier, en 1653, mais n'ont pas publié leurs résultats. L'attribution officielle d'une loi physique à un savant, par le nom qu'on lui donne, n'est pas un gage de la priorité de ce savant. Il existe de nombreux exemples du contraire. La postérité associe parfois à une loi physique le nom de celui qui l'a le plus fait connaître, sans nécessairement l'avoir découverte le premier.

$A = -267^\circ$. Un peu plus tard, Henri Victor REGNAULT (1810/1878) obtient la valeur plus précise $A = -273^\circ$. En combinant la loi de Charles avec la loi de Boyle $PV = \text{const.}$ (à température constante), on arrive à la loi des gaz parfaits :

$$PV = \alpha(T - A) \quad (6.6)$$

où α est une constante, proportionnelle à la masse de gaz contenue dans le volume V .⁶ Cette loi suggère fortement l'existence d'une température $A \approx -273^\circ$ à laquelle les volumes de tous les gaz seraient nuls (expérimentalement, cette constante est à peu de choses près la même pour tous les gaz). C'est là le premier signe de la possibilité de définir une échelle de température absolue.

Les différentes compressibilités Une autre découverte importante sur les gaz datant de la même période est la différence entre compression à température fixe (isotherme) et compression sans transfert de chaleur (adiabatique). Expliquons : la *compressibilité isotherme* κ d'un gaz est la variation relative de volume d'un gaz lors d'une variation de la pression, le tout à température constante. On peut exprimer mathématiquement cette notion par la dérivée partielle

$$\kappa = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial P} \right)_T \quad (6.7)$$

où l'indice T signifie que la dérivée est prise à température constante. Or, si la compression est effectuée sans qu'il soit possible au gaz de céder de la chaleur à son environnement, la température ne peut rester constante ; en fait, elle augmente. La compressibilité est alors différente et appelée *compressibilité adiabatique* κ_s . On démontre que

$$\kappa_s = \kappa \frac{c_v}{c_p} \quad (6.8)$$

où c_v est la chaleur spécifique du gaz à volume constant et c_p la chaleur spécifique à pression constante. Les Français CLÉMENT et DESORMES mesurent en 1819 que les deux chaleurs spécifiques sont différentes et qu'elles sont dans le rapport $\gamma = c_p/c_v \approx 1,4$ pour l'air.⁷ Comme $c_v < c_p$, ceci signifie qu'un gaz isolé thermiquement est moins compressible (plus "rigide") qu'un gaz qui donne de sa chaleur à son environnement lorsque comprimé. Ce fait en apparence banal est justement d'une importance capitale pour le fonctionnement de la machine à vapeur.⁸

6.3 La machine à vapeur

Les progrès réalisés au XIXe siècle dans l'étude de la chaleur sont indissociables des progrès techniques réalisés depuis le XVIIIe siècle dans la mise au point de machines susceptibles d'utiliser la chaleur dans le but de produire un travail mécanique. Nous allons donc brosser un tableau rapide des progrès de la machine à vapeur, de ses premiers balbutiements jusqu'aux perfectionnements apportés par James Watt.

Le pionnier de l'utilisation de la vapeur pour accomplir un travail est le Français Denis PAPIN (1647/1714). Assistant de Huygens, puis de Boyle, Papin résida tour à tour en France, en Angleterre, à Venise et en Allemagne.⁹ En 1681, Papin invente l'autocuiseur (la "marmite de Papin") : les aliments y sont cuits dans la vapeur sous pression. Il invente la chaudière, récipient résistant dans laquelle l'eau est amenée à ébullition, et la combinaison cylindre-piston qui permet d'utiliser la pression de vapeur pour accomplir un travail

⁶Plus tard, Avogadro proposera que des volumes égaux de gaz aux mêmes températures et pressions comportent des nombres égaux de *molécules* et la loi des gaz parfaits pourra s'écrire $PV = nR(T - A)$, où n est le nombre de moles de gaz et R est la même constante pour toutes les espèces de gaz.

⁷Plus précisément, pour un gaz diatomique (N_2 ou O_2), mais ceci n'est pas immédiatement apprécié à l'époque.

⁸Il joue aussi un rôle dans la vitesse du son. Newton, en se basant sur la loi de Boyle, avait obtenu une vitesse de son proportionnelle à la racine carrée $\sqrt{\kappa}$ de la compressibilité du gaz. Or, la valeur de Newton était de 20% inférieure à la valeur mesurée. L'erreur de Newton a été de supposer que la température est toujours la même au sein de l'onde sonore, même si la pression varie (de manière sinusoïdale pour une onde de fréquence donnée). Or, les parties du gaz qui sont comprimées lors du passage de l'onde se réchauffent nécessairement, parce que la chaleur provenant de leur compression n'a pas le temps d'être évacuée. Aussi, la compressibilité apparaissant dans la vitesse du son doit être adiabatique (κ_s) et non isotherme (κ). C'est Laplace qui rectifia le calcul de Newton et obtint une valeur de la vitesse du son en parfait accord avec les mesures.

⁹Protestant comme Huygens, il ne put retourner en France après la révocation de l'Édit de Nantes.

mécanique. Il construit une machine, assez inefficace, décrite à la Fig. 6.3. Le défaut de cette machine est son temps de refroidissement trop long et sa consommation excessive de combustible.

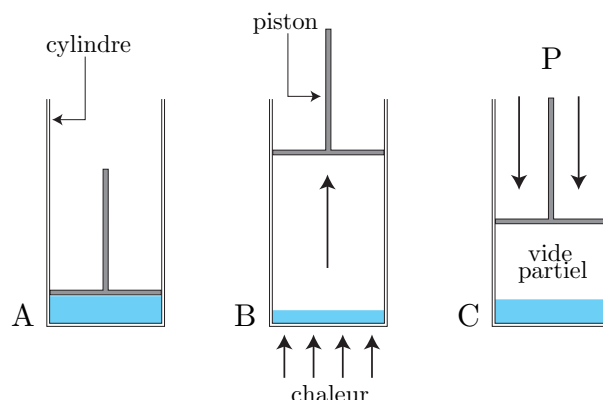


FIG. 6.3 : Schéma de la machine de Papin. Au départ (A), le piston est enfoncé complètement, jusqu'au niveau de l'eau. Ensuite (B), l'eau est chauffée et la vapeur pousse le piston jusqu'en haut. À ce stade la machine n'accomplit aucun travail utile, hormis vaincre le frottement. Ensuite (C), on laisse le tout refroidir. La vapeur se condense à l'intérieur du cylindre et la pression atmosphérique pousse sur le piston, le fait redescendre et entraîne la charge à laquelle le piston est liée par une poulie.

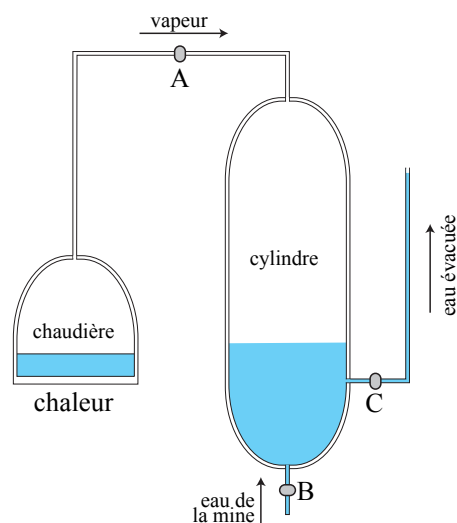


FIG. 6.4 : Schéma de la machine de Savery, destinée à pomper l'eau des mines. Dans une première étape, la valve B est fermée et les valves A et C sont ouvertes. La vapeur en provenance de la chaudière pousse l'eau du cylindre vers l'extérieur en C. Ensuite, A et C sont fermées et B est ouverte. On refroidit le cylindre de l'extérieur avec de l'eau. La vapeur restante dans le cylindre se condense et l'eau de la mine est aspirée dans le cylindre en B, en fait poussée d'autre part par la pression atmosphérique. Ensuite, on recommence le cycle, etc.

En 1698, l'Anglais Thomas SAVERY (1650/1715) brevète une pompe à eau actionnée par la vapeur sous pression (cf. Fig. 6.4). Cette pompe était utilisée pour retirer l'eau accumulée au fond des mines. Comme elle reposait sur la pression atmosphérique pour aspirer l'eau des mines, elle ne devait pas être installée à plus de 10 mètres du niveau de la nappe d'eau, donc en profondeur. L'eau aspirée était ensuite repoussée vers le haut par la vapeur sous pression. Son désavantage, outre d'être installée sous terre, est que la pression de vapeur nécessaire augmente avec la profondeur de la pompe. Le refroidissement était obtenu en arrosant le réservoir avec de l'eau.

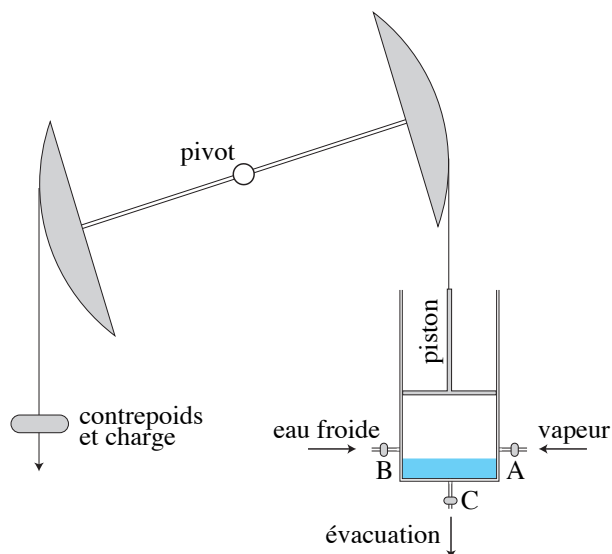


FIG. 6.5 : Schéma de la machine de Newcomen, une amélioration de celle de Papin. Dans une première étape, B et C sont fermées, la vapeur entre en A et pousse le cylindre vers le haut (aucun travail utile n'est accompli). Deuxièmement, A est fermé et B est ouvert : de l'eau froide est introduite dans le cylindre et condense la vapeur. La pression atmosphérique pousse le piston vers le bas et tire la charge sur l'autre balancier. Troisièmement, seul C est ouvert et l'eau condensée, ainsi que le reste de la vapeur, sont évacués. Ensuite, on recommence le cycle. L'ouverture des valves A, B et C, au début commandée par des humains, fut ensuite automatisée, c'est-à-dire réglée avec le mouvement du balancier.

La machine de Savery fut progressivement remplacée par celle de Thomas NEWCOMEN (1663/1729), achevée en 1712 et expliquée à la Fig. 6.5. Cette machine est en fait un perfectionnement de celle de Papin, le cylindre étant refroidi rapidement par une entrée d'eau froide. Elle dévore cependant de grandes quantités de combustible. Le combustible en question était surtout du bois au début du XVIII^e siècle, et sera progressivement remplacé par du charbon au cours du siècle.

James Watt Le perfectionnement de la machine de Newcomen fut l'oeuvre de l'Écossais James WATT (1736/1819). Watt est le type même de l'ingénieur appliquant la méthode scientifique. Watt débuta comme apprenti horloger et fut engagé comme garçon de laboratoire à l'Université de Glasgow où le professeur de physique lui demanda, en 1764, de réparer un modèle réduit de machine de Newcomen, utilisé pour les démonstrations pendant les cours, et qui n'avait jamais vraiment fonctionné. Watt constate effectivement que la petite machine, reproduction fidèle d'une vraie machine mais à une échelle plus petite, ne reçoit pas assez de vapeur de sa chaudière pour actionner le piston. Il en découvre la raison : dans la machine de Newcomen, la vapeur qui entre dans le cylindre doit non seulement pousser le piston, mais réchauffer les parois du cylindre après le cycle de refroidissement. Ce réchauffement consomme une partie de la vapeur. Or, dans un modèle réduit à l'échelle, le rapport surface/volume est plus grand que dans l'original et la proportion de vapeur consacrée au réchauffement augmente, quitte à neutraliser complètement la fonction première de la machine. Watt a donc l'idée de séparer complètement la fonction refroidissement du cylindre : il invente le *condenseur* (cf. Fig. 6.6) vers lequel la vapeur est évacuée à chaque cycle et dans lequel elle est refroidie. Le cylindre reste donc toujours à la même température. Il propose aussi un mécanisme à double action : ce n'est plus la pression atmosphérique qui pousse le piston, mais la vapeur, dans les deux sens. Il invente un moyen de convertir le mouvement alternatif du piston en mouvement circulaire, à l'aide d'une bielle et d'une manivelle. Il invente aussi un dispositif à rétroaction pour réguler l'entrée de la vapeur et stabiliser la machine. Watt brevète la machine à double action en 1780 et en a l'exclusivité jusqu'en 1800.

Watt a toujours à l'esprit le coût d'opération de la machine et cherche à la rendre plus efficace, c'est-à-dire à maximiser le travail mécanique produit pour une quantité donnée de charbon. Le perfectionnement de la machine à vapeur requiert de la part de Watt une suite d'observations scientifiques sur les propriétés de

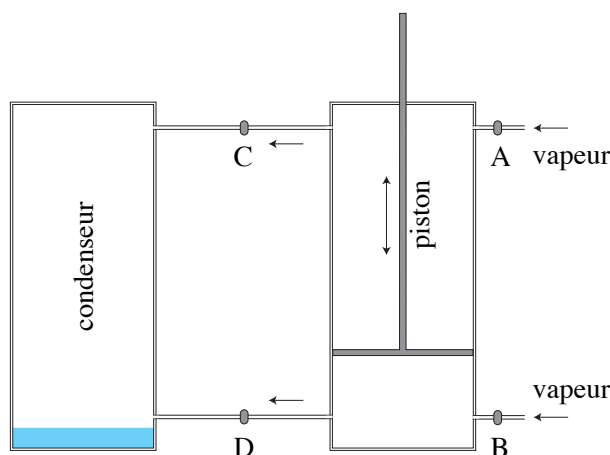


FIG. 6.6 : Schéma simplifié de la machine à vapeur à double action de Watt. Dans un premier temps, seule la valve A est ouverte et la vapeur pousse le piston vers le bas. La valve A n'est pas ouverte complètement jusqu'au bout de la course du piston : un mécanisme de détente est installé, de sorte que l'expansion de la vapeur – et non son entrée en force – pousse le piston dans la dernière partie de sa course. Deuxièmement, seule C est ouverte et la vapeur chaude se rue vers le condenseur froid. La pression au-dessus du piston est ensuite très diminuée (inférieure à la pression atmosphérique). Troisièmement, seule B est ouverte et le même procédé recommence, mais dans l'autre sens (le piston est poussé vers le haut). Quatrièmement, seule D est ouverte et la vapeur est évacuée vers le condenseur. Ensuite le cycle reprend. Le mouvement de va-et-vient du piston est converti en mouvement circulaire à l'aide d'une bielle et d'un vilebrequin et accomplit un travail. L'ouverture des quatre valves est réglée automatiquement par un mouvement alternatif secondaire (excentrique). L'entrée de la vapeur est contrôlée par un ingénieux mécanisme de rétroaction : le régulateur.

la vapeur en fonction de la pression et de la température. Il découvre avec Joseph BLACK la *chaleur latente*, c'est-à-dire la chaleur nécessaire pour faire passer l'eau de l'état liquide à l'état de vapeur, sans changement de température.¹⁰ Watt produit un diagramme donnant la pression de la vapeur en fonction de la température ("l'indicateur de Watt"), diagramme qui restera un secret industriel très bien gardé ("England's best kept secret") jusqu'au début du XIXe siècle.

Une révolution dans les transports Si l'utilité première de la machine à vapeur est de pomper l'eau des mines, elle trouva rapidement de nombreuses applications, notamment dans les usines de textiles où, conjuguée à l'invention de nouveaux dispositifs de tissage, elle permettra d'augmenter rapidement la production et de diminuer les prix. La machine à vapeur sera aussi la cause d'une révolution dans les transports, même si celle-ci se fit attendre quelques décennies. Des les années 1760/1770, le Français Joseph CUGNOT construit un véhicule automobile capable de se déplacer à 5 km/h et de traîner un canon. En 1783, le premier navire à vapeur, actionné par une machine de Watt, est expérimenté sur la Saône par JOUFFROY D'ABBANS ; le navire vogue pendant 15 minutes puis se disloque ! Le premier navire à vapeur rentable est construit par l'Américain Robert FULTON et opéré sur l'Hudson en 1807. La première locomotive sur rail est construite par l'Anglais TREVITHICK en 1803. En 1829, l'Anglais STEPHENSON construit l'engin le plus rapide de son époque : surnommée *the rocket*, cette locomotive se déplace à la vitesse vertigineuse de 20 km/h et peut tirer trois fois son poids ! À partir du milieu du XIXe siècle, les chemins de fer apparaissent dans tous les pays développés et les navires à voile sont progressivement remplacés par les navires à vapeur.

Les conséquences sociales de la première révolution industrielles furent énormes : urbanisation, apparition de la classe ouvrière, augmentation de la production de biens matériels et de l'espérance de vie, etc. Les structures politiques et sociales durent lentement s'adapter à ces changements causés en bonne partie par l'innovation technique en général et la machine à vapeur en particulier.¹¹

¹⁰Edmund Halley savait déjà en 1691 que l'eau bout à température constante.

¹¹Il serait présomptueux d'attribuer aux seules innovations techniques la révolution industrielle. Les conditions préalables à l'in-

6.4 La thermodynamique

Au début du XIXe siècle, les machines à vapeur étaient assez répandues, mais les principes physiques fondamentaux régissant leur fonctionnement restaient obscurs. Plusieurs physiciens, à l'instar de Watt, cherchaient des moyens d'améliorer l'efficacité des machines, c'est-à-dire la quantité de travail fournie par kilogramme de charbon consommé. Plusieurs se demandaient si leur efficacité ne pourrait pas être augmentée en changeant l'*agent*, c'est-à-dire en remplaçant la vapeur par un autre gaz, ou en augmentant la pression, etc.

6.4.1 Sadi Carnot

Plusieurs chercheurs se cassèrent les dents sur le problème de l'efficacité des machines à vapeur, mais un seul semble avoir compris qu'une donnée essentielle des ces machines était la présence de deux "réservoirs" : un réservoir chaud (la chaudière) et un réservoir froid (le condenseur, ou même l'air ambiant). Ce physicien s'appelait Sadi CARNOT (1796/1832), fils d'un autre scientifique, Lazare Carnot.¹² Sadi Carnot publia à compte d'auteur, en 1824, un petit livre intitulé *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*. Dans cet ouvrage, Carnot raisonne sur l'efficacité des "machines à feu" (on dirait aujourd'hui "machine à vapeur" ou, plus généralement, "machine thermique"), indépendamment de l'agent utilisé (vapeur, air, etc.). Les idées développées par Carnot dans cet ouvrage sont le fondement de la thermodynamique, mais sont basées sur une prémisse erronée : Carnot est convaincu de l'existence du calorique. En fait, il compare le fonctionnement d'une machine thermique à celui d'un moulin à eau, qui accomplit un travail en faisant chuter l'eau d'un niveau plus élevé à un niveau plus bas. Comme Carnot-père avaient longtemps étudié les moulins à eau, cette comparaison est apparue naturellement à son fils. Sadi Carnot raisonne que la température est le "niveau" du calorique et que la machine effectue un travail à partir de la "chute de calorique" d'une température plus élevée à une température plus basse.¹³ Carnot conçoit ensuite une *machine idéale*, la plus efficace possible, qui pourrait être utilisée dans les deux sens : elle serait *réversible* : en fournissant un travail mécanique, on pourrait faire remonter une quantité équivalente de calorique d'une température basse à une température plus élevée : un réfrigérateur, en quelque sorte. Carnot arrive à la conclusion que l'efficacité de la machine idéale réversible ne dépend que des températures T_1 et T_2 des réservoirs chaud et froid et il donne un exemple théorique de machine idéale fonctionnant avec un gaz parfait, qui fonctionne selon ce qu'on appelle le *cycle de Carnot*.

La Fig. 6.8 explique le fonctionnement du cycle de Carnot pour un gaz parfait. Les variations du volume du cylindre et de la pression à l'intérieur du cylindre sont portées sur un graphique volume-pression appelé *diagramme de Clapeyron*. Le cycle procède selon des courbes *isothermes* (c.-à-d. à température constante) décrites par l'équation $PV = \text{const.}$ et selon des courbes *adiabatiques* (c.-à-d. sans échange de chaleur, en isolation) décrites par l'équation $PV^\gamma = \text{const.}$, où γ est le rapport c_p/c_v (généralement comprise entre 1 et 2, selon les gaz). La forme de la courbe adiabatique a été obtenue par Jean-Baptiste BIOT (1774/1862) vers 1820 mais elle était connue de Watt (et gardée secrète : c'est l'indicateur de Watt mentionné plus haut) cinquante ans auparavant. Dans une machine à vapeur, les courbes adiabatiques correspondent à la détente de Watt, alors que les courbes isothermes correspondent à l'entrée et la sortie de la vapeur ; mais il faut garder à l'esprit que la machine à vapeur suit en pratique un cycle beaucoup plus complexe que celui de Carnot, qui n'est qu'un exercice théorique. Le travail W exercé par un gaz à pression P sur un piston de surface A qui se déplace sur une distance x est égal au produit de la force PA s'exerçant sur le piston par la distance parcourue : $W = PAx = P\Delta V$, où ΔV est l'accroissement de volume du gaz. La pression est généralement fonction du volume le long d'un cycle de fonctionnement, de sorte que le travail total effectué le long du

novation doivent aussi être présentes, à savoir un certain libéralisme économique et politique. C'est en Angleterre que ces conditions apparurent en premier et la première révolution industrielle y démarra dans la dernière moitié du XVIIIe siècle.

¹²Lazare Carnot était un homme d'action : d'une part, il a contribué à la théorie des machines et a fondé, avec Gaspard Monge, la géométrie moderne. Pendant la révolution française, il est élu député à la législative et à la convention et est membre du comité du salut public aux côtés de Robespierre. Il est alors en quelque sorte le ministre de la guerre et organise la levée en masse des soldats. Il a joué un rôle capital dans la victoire de la France contre les puissances étrangères qui l'avaient envahie pendant la révolution : on l'a surnommé "l'organisateur de la victoire".

¹³Cette conception de la chaleur a aussi un analogue électrique : la quantité de calorique correspond à la charge électrique circulant dans un circuit et la différence de température correspond à la différence de potentiel.



FIG. 6.7: Sadi CARNOT (1796/1832)

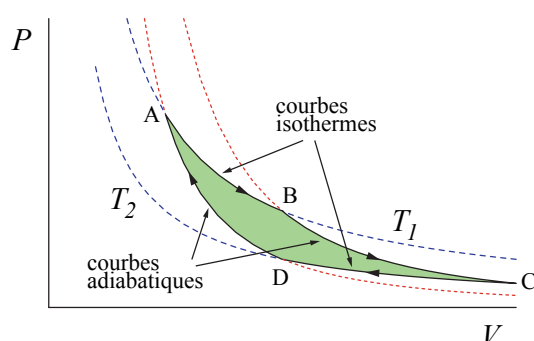


FIG. 6.8 : Schéma du cycle de Carnot. Sur AB, le cylindre est en contact avec le réservoir chaud (température T_1) et le gaz se dilate. Sur BC, le cylindre est isolé de son environnement, la dilatation continue mais la température du gaz diminue (détente). Sur CD, le cylindre est mis en contact avec le réservoir froid (température $T_2 < T_1$) et le gaz est contracté. Sur DA, le cylindre est de nouveau isolé, le gaz est contracté et sa température s'élève jusqu'à T_1 . Là, le cycle recommence. Le travail effectué par la machine en un cycle est l'aire limitée par le cycle (en gris).

cycle est donné par l'intégrale

$$W = \int_{ABC} P dV + \int_{CDA} P dV \quad (6.9)$$

Dans la partie supérieure du cycle (ABC), le gaz travaille sur le piston alors que dans sa partie inférieure (CDA) c'est le piston qui travaille sur le gaz (le deuxième terme de l'équation ci-haut est négatif), mais le bilan est positif et est égal à l'aire comprise à l'intérieur des courbes du cycle sur le diagramme de Clapeyron.

Le livre de Carnot passe inaperçu. Ce n'est que dix ans plus tard qu'Émile CLAPEYRON (1799/1864) en trouve une copie, comprend l'importance des concepts qui y sont développés et en fait la publicité. Quant à Carnot, il ne fait pas la publicité de son livre, peut-être parce qu'au moment même où il le publie il comprend que le calorique n'existe pas ! En fait, les conclusions de Carnot dans son ouvrage ne dépendent pas de façon critique de l'hypothèse du calorique, mais cela, Carnot ne le sait pas. Carnot est mort du choléra en 1832 (l'année du choléra) et ses papiers ont été brûlés par souci d'hygiène, sauf quelques-uns qui ont été retrouvés plus tard et publiés. Ces papiers et ces notes montrent que Carnot avait compris l'équivalent mécanique de la chaleur :

La chaleur n'est autre chose que la puissance motrice, ou plutôt que le mouvement qui a changé de forme. C'est un mouvement dans les particules des corps, partout où il y a destruction de puissance motrice il y a en même temps production de chaleur en quantité précisément proportionnelle à la quantité de puissance motrice détruite. Réciproquement, partout où il y a destruc-

tion de chaleur, il y a création de puissance motrice.

“Puissance motrice” doit être pris ici au sens d’“énergie mécanique”. Carnot arrive même à déterminer, on ne sait comment, l’équivalent mécanique de la chaleur : 3,77 joules par calorie (la véritable valeur est 4,18). Tout cela, vingt ans avant Joule.

6.4.2 Énergie et entropie

Joule James Prescott JOULE (1818/1889) est le fils d’un riche brasseur de Manchester et peut se permettre de faire de la physique en amateur. En 1841, il donne la relation entre le courant électrique, la résistance et la chaleur produite : c’est l’*effet Joule*. Il sait alors que la chaleur peut être produite par un travail mécanique ou électrique et n’est pas une substance. Il mesure l’équivalent en travail de la chaleur nécessaire pour faire grimper un gramme d’eau d’un degré Celsius (la calorie) et trouve la valeur acceptée aujourd’hui à 1% près. À la même époque, il commence sa série d’expériences au cours desquelles il mesure l’échauffement d’une quantité d’eau par un frottement mécanique, dont le travail est mesuré par la chute d’un poids. La conclusion de tout cela est que la chaleur est une forme de mouvement, une forme d’énergie *microscopique*, qui peut s’obtenir d’un travail mécanique. Indépendamment de Joule et un peu avant lui, l’Allemand Julius Robert von MAYER (1814/1878) arrive aussi à la conclusion que la chaleur n’est pas une substance, mais une forme d’énergie mécanique. Il calcule même l’équivalent mécanique de la chaleur en 1842 et obtient $1 \text{ cal} = 3,86 \text{ J}$.



FIG. 6.9: James Prescott JOULE (1818/1889)

Helmholtz En 1847 paraît un article de Hermann HELMHOLTZ (1821/1894) intitulé *Sur la conservation de l’énergie*, qui précise ces idées et énonce le *premier principe* de la thermodynamique : *la chaleur est une forme d’énergie mécanique microscopique. Tout travail mécanique effectué par un système (une machine) s’accompagne d’une diminution équivalente de son énergie interne et vice-versa*. Helmholtz était non seulement physicien et mathématicien, mais aussi physiologiste, ce qui lui permettait justement d’aborder la question de l’énergie sous plusieurs angles. En particulier, il raisonnait que si l’Univers est composé uniquement de particules, sur lesquelles agissent des forces centrales mutuelles, alors l’énergie mécanique, telle que définie par LAGRANGE à la fin du XVIII^e siècle, doit être conservée. L’audace est ici de supposer que les mêmes principes fondamentaux de physique s’appliquent à tout l’Univers, et en particulier aux êtres vivants. Le mérite principal de Helmholtz est d’avoir formulé un principe qui puisse unir toutes les sciences connues et de l’appliquer à la mécanique, à l’électromagnétisme, à l’astronomie, à la chimie et à la physiologie.

Clausius C’est l’Allemand Rudolf CLAUSIUS (1822/1888) qui va réconcilier la théorie dynamique de la chaleur avec les idées de Carnot et devenir ainsi le “père de la thermodynamique” (Carnot en est le “grand-père”). L’idée est simple : une machine thermique reçoit de la chaleur de la source chaude, en transforme une partie en travail mécanique et cède le reste à la source froide. Il y a donc “chute de chaleur” de la source chaude à la source froide, mais une partie de cette chaleur est convertie en travail utile. Les résultats de Carnot sur les machines idéales réversibles demeurent intacts.

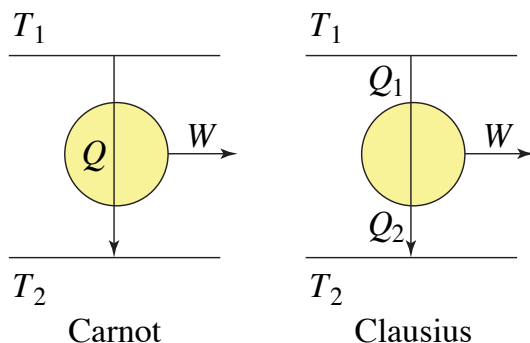


FIG. 6.10 : Schéma d'une machine thermique, selon la conception de Carnot en 1824 et celle de Clausius. Carnot, avant son adhésion à la théorie dynamique de la chaleur, conçoit la machine thermique comme extrayant un travail W de la chute du calorique en quantité Q d'un réservoir chaud (température T_1) vers un réservoir froid (température T_2 , inférieure à T_1). Clausius réalise que la chaleur Q_1 cédée par le réservoir chaud est partiellement transformée en travail mécanique et que le reste, $Q_2 = Q_1 - W$, est cédé au réservoir froid.

La température absolue La théorie dynamique de la chaleur ne convainc pas tout le monde immédiatement. En particulier, William THOMSON (1824/1907), plus tard Lord KELVIN, est initialement un partisan du calorique. Il fait un stage d'études à Paris, rencontre Clapeyron et parvient à trouver une copie du livre de Carnot en 1848, après 3 ans de recherches ! À l'aide des principes de Carnot, le frère de Kelvin (James THOMSON) arrive à prédire que la température de fusion de l'eau diminue quand la pression augmente ! Les résultats de Kelvin semblent démontrer que Carnot a raison et que le principe de la chute du calorique permet de faire des prédictions correctes. Seulement, Joule aussi semble avoir raison et le calorique ne semble pas exister ! Après la lecture de Clausius, Kelvin se convertit à la théorie dynamique de la chaleur et utilise les idées de Carnot sur les machines réversibles pour définir une échelle de température *absolue*, indépendante des agents utilisés dans les thermomètres. L'idée d'une échelle absolue de température était naturelle depuis la découverte de la loi de Charles et les expériences de Gay-Lussac. Pour la définir en pratique, il fallait utiliser des thermomètres à base de gaz parfaits. Seulement, aucun gaz n'est parfait : tous les gaz montrent des déviations par rapport à la loi de Charles quand la température est suffisamment basse. L'idée de Kelvin est de définir cette échelle indépendamment des gaz parfaits, mais seulement en fonction du cycle de Carnot, plus universel (cf. Fig. 6.8) : si la quantité de chaleur reçue de la source chaude sur AB est Q_1 et que la quantité de chaleur cédée à la source froide sur CD est Q_2 , alors le rapport des températures absolues des deux réservoirs est

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{Q_1}{Q_2} \quad (6.10)$$

Évidemment, cette définition est purement théorique et doit être mise en pratique dans des appareils de mesure concrets, ce qui n'est pas immédiatement évident. D'autre part, la définition (6.10) ne définit l'échelle de température qu'à une constante multiplicative près. On a choisi de fixer cette constante en demandant que les graduations de cette échelle soient les mêmes que celles de l'échelle Celsius, c'est-à-dire qu'il y ait 100 degrés entre les points de fusion et d'ébullition de l'eau (à pression normale). Le point de fusion de l'eau est alors 273,15 K (degrés Kelvin) et le point d'ébullition 373,15 K. Il ressort de la relation (6.10) qu'au zéro absolu ($-273,15^\circ$), aucune chaleur ne peut être transférée : le froid absolu, en quelque sorte. En fonction des températures absolues, l'efficacité de la machine de Carnot, c'est-à-dire le rapport du travail accompli ($W = Q_1 - Q_2$) sur la chaleur fournie (Q_1), est

$$\frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (6.11)$$

Quant à la loi des gaz parfaits, elle prend alors la forme $PV = nRT$, où n est le nombre de moles de gaz et R une constante.

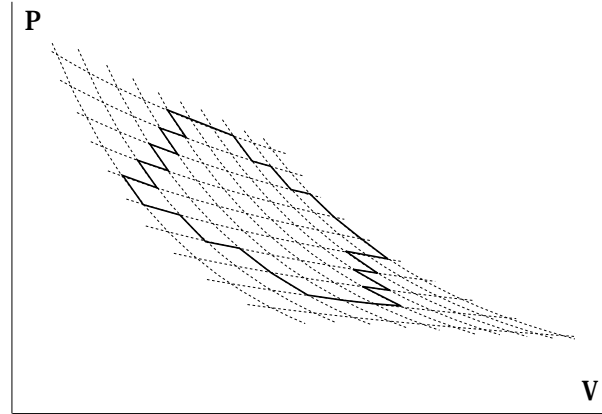


FIG. 6.11 : Tout cycle dans un diagramme de Clapeyron peut être décomposé en une somme de cycles de Carnot infinitésimaux. Sur ce diagramme, chaque losange constitue un petit cycle de Carnot et le cycle indiqué en trait gras en englobe un certain nombre. Le travail effectué au cours de ce cycle est la somme des travaux effectués lors de chacun des cycles de Carnot englobés. Dans la limite où la taille des cycles de Carnot tend vers zéro, tout cycle peut être représenté de cette façon.

L'entropie et les machines irréversibles En 1854, Clausius introduit une nouvelle quantité, l'*entropie*, qu'il définit comme suit.¹⁴ Dans la machine idéale de Carnot, la chaleur est échangée à température constante et aucune chaleur n'est échangée quand la température varie. En utilisant la température absolue de Kelvin et en supposant qu'une chaleur est positive si elle est reçue par la machine et négative si elle est cédée par la machine, le bilan calorifique du cycle de Carnot peut s'écrire

$$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0 \quad (6.12)$$

Clausius considère ensuite un cycle quelconque, pas nécessairement un cycle de Carnot, et conçoit qu'un tel cycle peut aussi être réversible si la condition suivante est satisfaite :

$$\oint \frac{dQ}{T} = 0 \quad (6.13)$$

où la différentielle de chaleur dQ est reçue par la machine sur un élément infinitésimal du cycle, sur lequel la température (variable) est T . Une façon de démontrer la relation (6.13) à partir de la relation de Carnot (6.12) est de composer le cycle quelconque en une somme infinie de cycles de Carnot, dans l'esprit du calcul intégral, comme sur la Fig. 6.11. En fait, tout cycle est réversible s'il est parcouru suffisamment lentement, si le système (par exemple le gaz) est toujours pratiquement à l'équilibre thermique en tout point du cycle. Ceci est un idéal, jamais réalisé en pratique : une machine non idéale accomplit moins de travail qu'une machine réversible et cède trop de chaleur à la source froide. Par conséquent

$$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} < 0 \quad (\text{Carnot}) \quad \text{ou} \quad \oint \frac{dQ}{T} < 0 \quad (\text{Clausius}) \quad (6.14)$$

Si la suite des changements qui amènent une machine (ou un système en général) du point A au point B sont partout réversibles, alors l'intégrale

$$\int_A^B \frac{dQ}{T} \quad (6.15)$$

ne dépend pas du parcours choisi pour la calculer sur le diagramme de Clapeyron et donc ne dépend que des points d'arrivée et de départ. Cette intégrale est donc la différence d'une fonction S entre les deux

¹⁴Le mot *entropie* est forgé à partir du grec *entropia* (εντροπια), qui signifie "retour en arrière", une allusion à la réversibilité.

points :

$$\int_A^B \frac{dQ}{T} = S(B) - S(A) \quad (\text{réversible}) \quad (6.16)$$

C'est cette fonction que Clausius appelle *entropie*. Elle est définie par cette intégrale et par un point de référence arbitraire. L'entropie caractérise l'état d'un système et peut servir de variable de description du système au même titre que la pression, le volume ou la température.

Une machine est réversible si l'entropie ne change pas au cours d'un cycle. Par contre, si la machine est irréversible, la chaleur cédée est trop grande et

$$\int_{A \text{ irr.}}^B \frac{dQ}{T} < S(B) - S(A) \quad (\text{irréversible}) \quad (6.17)$$

Cette formule est une forme du *deuxième principe de la thermodynamique*, formulé pour la première fois de manière claire par Clausius. Ce principe vise en fait beaucoup plus large que la simple efficacité des machines à vapeur, car les raisonnements impliqués sont très généraux. Il revient à dire que l'entropie d'un système fermé ne peut qu'augmenter, ou, dans le cas d'un processus réversible, rester la même.

Par exemple, considérons deux réservoirs à des températures T_1 et T_2 ($T_1 > T_2$) et considérons une machine très simple qui ne produit aucun travail et dont le seul rôle est de transmettre de la chaleur du réservoir chaud au réservoir froid (cette machine n'est en fait qu'un contact thermique). Soit $\Delta Q > 0$ la quantité de chaleur cédée par le réservoir chaud, égale à la quantité de chaleur reçue par le réservoir froid. Selon la définition de l'entropie, le changement d'entropie du réservoir chaud est $\Delta S_1 = -\Delta Q/T_1$, alors que le changement d'entropie du réservoir froid est $\Delta S_2 = \Delta Q/T_2$ (on considère que les réservoirs sont suffisamment grands pour que leur changement de température soit négligeable si ΔQ n'est pas trop grand). Le changement total d'entropie des deux réservoirs est donc

$$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2 = \Delta Q \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) > 0 \quad (6.18)$$

Autrement dit, le processus de transfert de chaleur entre deux objets de températures différentes augmente l'entropie totale et est donc irréversible. Une façon équivalente de formuler le deuxième principe de la thermodynamique est d'affirmer que lorsque deux objets de températures différentes sont mis en contact, l'objet froid se réchauffe et l'objet chaud se refroidit, et non le contraire, l'énergie étant par ailleurs conservée.

6.4.3 L'interprétation statistique et la théorie cinétique des gaz

Après les travaux de Joule, les adeptes de la théorie dynamique de la chaleur savaient que la chaleur est une forme d'énergie, mais n'étaient pas tous d'accord quant à la nature précise de cette énergie. À cette époque, l'hypothèse atomique de Dalton n'était généralement pas acceptée. Au mieux, elle était considérée comme une hypothèse de travail utile, mais les atomes n'étaient pas sérieusement considérés comme des objets concrets. Les recherches sur la chaleur et les gaz allait changer tout cela et plusieurs physiciens, en particulier James Clerk MAXWELL, l'Autrichien Ludwig BOLTZMANN (1844/1906) et l'Américain Josiah Willard GIBBS¹⁵ (1839/1903), allaient tenter de déduire les lois de la thermodynamique et les propriétés des gaz à partir de l'hypothèse que ces derniers sont formés de molécules en mouvement. Plus généralement, l'étude des propriétés d'un système physique à partir du mouvement de ses molécules est appelée *mécanique statistique* ou *physique statistique*. Appliquée particulièrement aux gaz, la mécanique statistique devient la *théorie cinétique des gaz*.

On peut considérer Daniel BERNOULLI (1700/1782) comme le pionnier de la théorie cinétique des gaz. C'est à lui que revient l'explication de la pression d'un gaz par les collisions de ses molécules avec les parois de son contenant. Il faut attendre Clausius pour que l'idée d'une théorie cinétique des gaz soit prise au sérieux.

¹⁵Gibbs, le premier véritable physicien théoricien des États-Unis, est aussi l'auteur de la *notation vectorielle* encore utilisée de nos jours.

Libre parcours moyen L'un des premiers problèmes conceptuels soulevé par cette théorie est que, d'après les calculs les plus élémentaires, chaque molécule d'un gaz devrait se déplacer à une vitesse énorme dans les conditions ambiantes : plusieurs centaines de mètres par seconde ! Si tel est le cas, pourquoi une odeur prend-elle tant de temps à se répandre lorsqu'on ouvre un flacon ? Clausius répond que, même si les molécules se déplacent la plupart du temps en ligne droite et à vitesse constante, elles ont des collisions occasionnelles, de sorte que la trajectoire d'une molécule en particulier est très irrégulière, ce qui explique le temps relativement long pour la diffusion des substances. Clausius fait un calcul approximatif du libre parcours moyen d'une molécule, c'est-à-dire de la distance moyenne ℓ qu'elle parcourt avant d'entrer en collision avec une autre molécule. Si chaque molécule est comparée à une sphère de diamètre d et qu'il y en a n par unité de volume, alors

$$\ell \approx \frac{1}{nd^2} \quad (6.19)$$

Maxwell et la distribution des vitesses La prochaine poussée de la théorie cinétique est l'oeuvre de Maxwell, dans un article publié en 1860. Maxwell conçoit que toutes les molécules d'un gaz ne vont pas à la même vitesse, mais qu'elles ont une *distribution statistique* de vitesses et il parvient à donner la forme mathématique de cette distribution. En langage moderne, la probabilité qu'une molécule de masse m ait une vitesse comprise entre les valeurs v et $v + dv$ est $P(v)dv$, où

$$P(v) = Cv^2 \exp -\frac{mv^2}{2k_B T} \quad (6.20)$$

(C est une constante de normalisation et k_B est la constante dite de Boltzmann, reliée à la constante des gaz R et au nombre d'Avogadro N_0 par la relation $R = N_0 k_B$). On montre facilement de cette formule que l'énergie cinétique moyenne d'une molécule est

$$\langle \frac{1}{2}mv^2 \rangle = \frac{3}{2}k_B T \quad (6.21)$$

Autrement dit, la température absolue est proportionnelle à l'énergie moyenne des molécules.

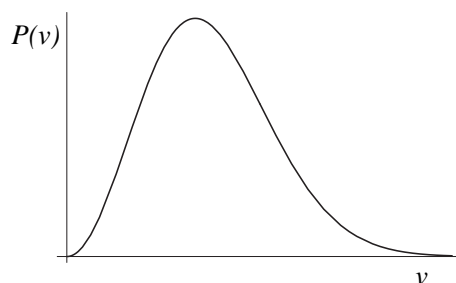


FIG. 6.12: La distribution statistique des vitesses des molécules dans un gaz parfait, selon Maxwell.

Dans le même travail, Maxwell calcule la viscosité d'un gaz à partir du libre parcours moyen de Clausius et démontre qu'elle est indépendante de la pression, ce que Maxwell confirme dans une suite d'expériences qu'il mène à l'aide de sa femme. Connaissant la viscosité mesurée, Maxwell peut en déduire le libre parcours moyen ℓ . Comment déduire de cela la taille des molécules ? Il suffit de connaître une autre relation entre n et d . Cette relation, LOSCHMIDT la propose en 1865 en faisant l'hypothèse que les molécules d'un liquide sont toutes serrées les unes contre les autres. En divisant le volume du liquide par celui du gaz qui provient de son évaporation, on trouve $\frac{1}{6}\pi nd^3$. On peut donc en déduire que $d \approx 10^{-9}\text{m}$. Ce nombre est environ trois fois trop grand pour les molécules diatomiques de l'air, mais il donne une bonne idée de l'ordre de grandeur des molécules. Les atomes commencent à donner des signes de réalité !

Le problème de l'irréversibilité La théorie cinétique des gaz permet d'interpréter l'énergie interne d'un gaz en fonction de l'énergie cinétique des molécules qui le composent. Le premier principe de la thermodynamique est alors entièrement compris en fonction des principes élémentaires de la mécanique. Une telle

réduction est plus difficile à réaliser pour le deuxième principe : l'entropie ne se laisse pas exprimer en fonction de quantités mécaniques simples. D'ailleurs, les lois de la mécanique sont réversibles : que le temps s'écoule vers le futur ou vers le passé, elles restent les mêmes ! Par exemple, si on filme un processus de collision entre deux particules, ou le mouvement d'une planète autour du Soleil, et qu'on repasse le film à l'envers, le mouvement inversé sera aussi compatible avec les lois de la mécanique que le mouvement direct et seul l'opérateur saurait que le film défile à l'envers ! Il en est autrement dans un système complexe. Par exemple, considérons un contenant divisé en deux parties séparées par une cloison. Supposons que la moitié droite du contenant est remplie d'un gaz et la moitié gauche est vide. Si on ouvre la cloison au temps $t = 0$, le gaz remplira rapidement tout le volume du contenant (ce processus est appelé la *détente de Joule*¹⁶) et il est inconcevable qu'il en vienne, à un moment donné, à se trouver, de lui-même, tout entier dans une moitié du contenant : la probabilité que les N molécules se trouvent dans une même moitié du contenant à un moment donné est 2^{-N} , un nombre astronomiquement petit, même pour une valeur de N aussi petite que 100. La détente du gaz quand on enlève la cloison est donc *irréversible*. Autre exemple, plus frappant : on filme la destruction d'un édifice par des explosifs ; par la suite, on s'aperçoit immédiatement si le film est projeté en sens direct ou en sens inverse ! Par contre, si on filme une machine de Carnot idéale, on ne saurait dire si le temps s'écoule dans le sens direct ou inverse, c'est-à-dire si la machine fonctionne pour produire un travail ou comme réfrigérateur. En résumé, le problème conceptuel lié au deuxième principe de la thermodynamique quand on cherche à l'interpréter en fonction des lois de la mécanique est l'irréversibilité des processus complexes en comparaison de la réversibilité des lois de la mécanique.

Le démon de Maxwell L'irréversibilité est en fait étroitement liée au concept d'*information*. Maxwell le démontra clairement en imaginant ce qu'on a appelé par la suite le "démon de Maxwell". Considérons encore une fois notre contenant rempli de gaz, dont la cloison a été enlevée. Remettons la cloison en place, alors que le gaz est également réparti dans les deux moitiés. Supposons qu'une porte minuscule a été pratiquée dans la cloison et qu'un être infiniment intelligent et observateur (le "démon") en ait le contrôle. En observant les molécules qui se dirigent vers la porte, le démon peut décider de laisser passer dans un sens les molécules qui vont plus vite que la moyenne et dans l'autre sens les molécules plus lentes que la moyenne. De cette manière, l'une des moitiés du contenant va se refroidir et l'autre se réchauffer, sans qu'aucun travail n'ait été accompli (on suppose que le démon n'effectue aucun travail, car il ne pousse pas les molécules : il ne fait que leur ouvrir la porte). Ceci viole bien sûr le deuxième principe car l'entropie totale du contenant a diminué. En fait, parce que le démon de Maxwell a une capacité d'observation supérieure à la nôtre, il n'a pas besoin de la notion d'entropie !



FIG. 6.13: Ludwig BOLTZMANN (1844/1906)

C'est Ludwig BOLTZMANN qui donna une expression de l'entropie d'un système physique en fonction de notre manque d'information complète sur ce système. Boltzmann introduisit les notions d'état *microscopique* et d'état *macroscopique*. Par exemple, l'état macroscopique d'un gaz simple est spécifié par la pression et le volume (2 paramètres) alors que l'état microscopique est déterminé par les positions et les vitesses de toutes les molécules du gaz ! Il est impossible à un humain de connaître précisément l'état microscopique, mais c'est cet état qui détermine comment le gaz évolue dans le temps, par l'intermédiaire des lois de la méca-

¹⁶On aurait fort bien pu l'appeler *détente de Gay-Lussac*, car ce dernier en fit l'expérience dès 1807 et vérifia que le processus en question ne change pas la température du gaz, ou très peu.

nique. À chaque état macroscopique correspond un très grand nombre d'états microscopiques, qu'on note $\Omega(P, V)$ (il dépend de la pression et du volume, et en général de tous les paramètres macroscopiques). Selon Boltzmann (1876), l'entropie S est simplement le logarithme du nombre d'états microscopiques compatibles avec l'état macroscopique :

$$S = k_B \ln \Omega \quad (6.22)$$

Ainsi, quand on combine deux systèmes (les deux moitiés d'un contenant, par exemple), le nombre d'états au total est $\Omega = \Omega_1 \Omega_2$ parce que chaque moitié peut être dans n'importe lequel état et toutes les combinaisons sont possibles (les indices 1 et 2 réfèrent à chacune des deux moitiés). L'entropie totale est alors $S = S_1 + S_2$, comme il se doit (l'entropie est une quantité additive). D'autre part, lors d'un processus irréversible comme l'ouverture de la cloison citée plus haut, le nombre d'états microscopiques compatible avec notre connaissance du système augmente considérablement et donc l'entropie aussi.

Boltzmann fit beaucoup pour faire reconnaître la réalité des molécules et des atomes à une époque où l'"hypothèse atomique" était souvent considérée comme une simple hypothèse de travail sans fondements solides. Il était engagé dans des controverses épuisantes contre les adversaires de la théorie atomique, notamment Wilhelm OSTWALD (1853/1936) et Ernst MACH (1838/1916). Le débat débordera même sur la scène publique, ce qui ne fera qu'ajouter de la confusion sans apporter aucun argument sérieux pour ou contre la théorie atomique.

Chapitre 7

La révolution chimique

Nous avons vu dans le chapitre précédent comment l'hypothèse atomique s'est insérée dans l'étude de la chaleur et nous avons fait allusion à la controverse de la fin du XIXe siècle sur la réalité des atomes dont Boltzmann fut victime. Nous allons maintenant faire un retour en arrière et décrire les progrès de la chimie jusqu'à l'adoption de l'hypothèse atomique.

7.1 Les ancêtres de la chimie

La Chimie comme science est née au XVIIIe siècle. Elle est l'héritière de trois types d'activités : la métallurgie, la pharmacie et, surtout, l'alchimie. Le mot chimie vient évidemment du mot *alchimie*, lui-même dérivé de l'arabe *al-Kîmiyâ*. Ce mot arabe proviendrait soit du grec *khuma* (χυμα) qui désigne un écoulement (comme celui d'un métal en fusion), ou, plus probablement, du grec *Khêmia* (ἡμία), qui désigne l'Égypte¹ (probablement le berceau de l'Alchimie).

7.1.1 L'alchimie

Le but de l'alchimie est principalement de découvrir des principes qui permettent de transformer la matière. En particulier, elle vise la *transmutation* des métaux vils (le plomb, le mercure) en métaux nobles (l'or, l'argent). Une telle définition est cependant trop simplifiée, car beaucoup d'alchimistes recherchaient non seulement le secret de la transmutation des métaux, mais aussi une *médecine universelle*, un élixir de longue vie qui leur permettrait de vivre pendant des siècles. En fait, le but ultime du véritable alchimiste était d'acquiescer, par une pratique longue et patiente et une méditation non moins longue, le secret de la *pierre philosophale*, substance (ou principe) qui permettrait de fabriquer à la fois l'élixir de longue vie et la *poudre de projection* qui sert à la transmutation des métaux. La pierre philosophale est réputée s'obtenir par une suite très longue d'opérations sur des matières premières communes, mais cette matière première et ces opérations sont gardées secrètes. Le procédé ne peut s'obtenir qu'en recevant le secret d'un initié et les textes alchimiques ne contiennent que quelques indications mineures, parfois trompeuses. L'alchimie est donc avant tout une activité *ésotérique*, c'est-à-dire qui procède par transmission d'un savoir caché. Les ouvrages alchimiques sont délibérément obscurs et cachent leurs secrets dans un langage symbolique dont la signification n'est pas claire. Citons un alchimiste mettant en garde ses lecteurs :

Je t'affirme en toute bonne foi que si tu veux expliquer les écrits des alchimistes par le sens vulgaire des paroles, tu te perds dans les embûches d'un labyrinthe sans issue d'où tu ne pourras sortir, n'ayant pas pour te diriger le fil d'Ariane, et, quels que soient tes efforts, ce sera autant d'argent perdu. – ARTHEPHIUS

¹ ce mot vient probablement de la langue égyptienne, où il signifierait "terre noire", une allusion à la fertilité des terres égyptiennes.

Origine de l'alchimie D'où vient l'alchimie et quand est-elle apparue ? La plupart des spécialistes pensent qu'elle est née en Égypte, au début de l'ère chrétienne. D'autres pensent qu'elle remonte à plus loin et qu'elle tire ses origines de la science ésotérique des prêtres égyptiens. La légende veut qu'elle ait été fondée par le dieu égyptien Thot, dieu du calcul et du savoir, conseiller des autres dieux. Les Grecs identifièrent ce dieu à Hermès et le qualifièrent de "trois fois grand" ou *Trismégiste*. Pour cette raison, les principes "philosophiques" et mystiques à la base de l'alchimie sont appelés *philosophie hermétique*.² La philosophie hermétique, telle que contenue dans la littérature alchimique, montre une parenté évidente avec la doctrine néo-platonicienne, sorte de mariage des philosophies de Platon et d'Aristote avec les idées mystiques des religions orientales. Du point de vue de la pensée rationnelle, le néo-platonisme est certainement en régression face à la philosophie grecque et son apparition, vers la fin du II^e siècle, coïncide avec une baisse de l'activité scientifique.

Après le déclin de l'empire romain, l'alchimie, comme les sciences grecques, fut reprise et relancée par les Arabes. L'alchimiste arabe le plus célèbre est JABIR IBN-HAYYAN (ou GEBER pour les Occidentaux). La traduction de ses oeuvres suscita des émules dans l'Occident médiéval : l'alchimie devient populaire au moyen-âge à partir du XIII^e siècle et ne commença à décliner qu'au XVII^e siècle. Certains textes alchimiques sont attribués à des théologiens reconnus comme Albert le Grand, Raymond Lulle et Arnaud de Villeneuve. Les textes hermétiques anciens avaient un immense prestige au moyen-âge et surtout pendant la Renaissance : on les faisait remonter à l'époque de Moïse et on y décelait ce qu'on interprétait comme des annonces de la venue du Christ. Ceci explique que plusieurs théologiens aient pu s'y intéresser. Ils avaient en cela la bénédiction de Saint-Augustin (Ve siècle) qui croyait qu'Hermès Trismégiste avait annoncé la venue du Christ. Or, en 1614, Isaac Casaubon, un helléniste passant comme "l'homme le plus savant d'Europe", étudie les textes hermétiques et conclut, en raison de leur style et des idées auxquelles ils font référence, qu'ils datent du début de l'ère chrétienne et non de l'époque de Moïse ! Cette critique contribue peu à peu à diminuer le crédit de la philosophie hermétique, qui demeure néanmoins très populaire au XVII^e siècle, en pleine révolution scientifique. Peu à peu, les alchimistes d'hier font de moins en moins appel à des arguments surnaturels et deviennent des chimistes...

Principes de l'alchimie Les conceptions des alchimistes sur la matière, en autant qu'on puisse en juger de leurs écrits, ne sont pas très éloignées de la tendance platonicienne ou aristotélicienne. Ils font généralement référence aux quatre éléments classiques (terre, eau, air, feu) et ajoutent par-dessus des "principes", qui ne sont pas des éléments comme tels, mais plutôt des qualités, des archétypes. Geber distingue le principe "soufre", qui est mâle, actif, chaud, fixe et dur, en opposition au principe "mercure", qui est femelle, passif, froid, volatile et fusible. Basile Valentin et Paracelse ajoutent un troisième principe, le "sel", intermédiaire entre les deux premiers. Les sept métaux connus des anciens (or, argent, mercure, plomb, étain, fer, cuivre) sont associés aux sept astres (Soleil, Lune, Mercure, Saturne, Jupiter, Mars, Vénus).

Ce qui distingue peut-être le plus l'alchimie de la science moderne est sa vision *organique*, plutôt que mécanique, de l'Univers. Au contraire de la philosophie mécanique qui a en quelque sorte tenté, depuis Descartes, d'expliquer la vie par des mécanismes, l'alchimie attribue à la manière "inerte" les qualités du vivant. Ainsi, toute chose est créée par la conjonction de principes mâle et femelle. Par exemple, on croyait que le métal était en croissance au sein de la terre et que, dans sa forme achevée, ce métal était de l'or. Mais si sa croissance était interrompue (par extraction ou par avortement naturel), ce métal adoptait une forme plus vile (argent, plomb, etc.). La tâche de l'alchimiste était de rassembler les conditions propices à la gestation normale du métal afin de lui permettre d'atteindre le plus haut degré de maturité, c'est-à-dire de devenir de l'or. Pour ce faire, il fallait accélérer la gestation naturelle en extrayant des substances grossières les principes actifs (mâle et femelle) sous forme concentrée.

Héritage de l'alchimie La contribution des alchimistes n'est cependant pas à négliger. La littérature alchimique est énorme : des dizaines de milliers de textes. Il semble même que Newton ait écrit plus de textes sur l'alchimie que sur la physique et les mathématiques [84]. Les alchimistes ont contribué à la conception d'*instruments* et ont dans certains cas découvert des *éléments nouveaux*. L'un des alchimistes les plus connus du moyen-âge, Basile VALENTIN, moine bénédictin, découvrit un nouveau métal. La légende dit

²En français moderne, le mot hermétique qualifie soit un texte obscur et incompréhensible, comme ceux de la philosophie hermétique, soit un récipient parfaitement fermé, comme ceux utilisés par les alchimistes.

qu'il utilisa un sel de ce métal comme remède qu'il administra à plusieurs moines de son monastère, qui en moururent. Pour cette raison, cet élément fut appelé *antimoine*. Dans son traité alchimique *Le char de triomphe de l'antimoine*, Valentin dit "Toutes les choses proviennent d'une même semence, toutes, à l'origine, ont été engendrées par la même mère...", ce qui montre l'importance que les alchimistes attachaient à la recherche d'un principe premier, d'une compréhension unifiée des substances. Mises à part ses vaines tentatives de transmutation, Valentin expliqua comment produire l'acide chlorhydrique et comment produire l'eau de vie (*aqua vita*, ou *aqua ardens*) par distillation.

7.1.2 Les artisans

Le secteur d'activité où la transformation des substances et leur caractérisation sont les plus importantes au moyen-âge et pendant la Renaissance est sans doute la métallurgie. L'industrie des mines, comme les autres activités économiques de cette époque, était basée sur une tradition d'*artisans*. Les connaissances techniques ne se diffusaient pas et étaient transmises lors d'un cycle d'apprentissage pratique. On peut dire qu'une certaine dose de secret, le secret artisanal (ancêtre du secret industriel), protégeait les corporations de métiers. Pendant la Renaissance, cet état de choses va changer car on assistera à la publication de nombreux traités techniques, écrits en langage clair et non voilé.

Parmi ces traités, citons *De re metallica* de Georg BAUER (1491/1556), surnommé AGRICOLA, et *La pirotechnia* de Vannoccio BIRINGUCCIO (1480/1540). Dans ce dernier traité, l'auteur décrit les procédés de distillation, de fonte des métaux, de fabrication de la poudre à canon, etc.

Bernard Palissy Le céramiste BERNARD PALISSY (1510/v.1589) est l'archétype de l'artisan de la Renaissance, possédant une connaissance pratique des choses et se méfiant des soi-disants "philosophes" hermétiques. Dans l'avertissement au lecteur au début de l'un de ses livres, il écrit :³

Le désir que j'ai que tu profites à la lecture de ce livre m'a incité à t'avertir que tu te donnes garde d'enivrer ton esprit de sciences escrites aux cabinets par une théorie imaginative ou crochetée de quelque livre escrit par imagination de ceux qui n'ont rien pratiqué, et te donne garde de croire les opinions des fols qui disent que théorique a engendré pratique. Si l'homme pouvait exécuter ses imaginations, si les choses conçues en esprit se pouvaient exécuter, les souffleurs d'alchimie feroient de belles choses et ne chercheroient vainement l'espace de cinquante ans comme beaucoup l'ont fait.

Palissy était un spécialiste des céramiques, des émaux et des verres colorés. Il alla même jusqu'à brûler ses meubles pour entretenir son four à céramique quand il manqua de bois. Palissy ne se contenta pas de son métier mais fit de nombreuses observations raisonnées. Il affirma, le premier à notre connaissance, que l'eau des fleuves provient exclusivement de l'eau de pluie qui s'écoule vers la mer. Il découvrit des fossiles et proposa correctement que ce sont les vestiges d'animaux et de végétaux disparus. Palissy vivait à l'époque des guerres de religion en France ; protestant, il fut emprisonné à la Bastille et y mourut.

Paracelse Le médecin PARACELSE (1492/1541) est une autre figure marquante de la pré-chimie de la Renaissance. Personnage haut en couleur, il s'adonnait occasionnellement à des concours de beuverie avec les paysans et prenait un malin plaisir à se faire des ennemis. Il préconisa l'utilisation des médicaments à base de minéraux (iatrochimie) et non seulement de végétaux, contre l'opinion révéérée du médecin grec GALIEN. Malheureusement, Paracelse partageait avec les alchimistes un goût pour les notions obscures.

7.2 La naissance de la chimie

7.2.1 Quelques figures des XVIIe et XVIIIe siècles

Entre la Renaissance et la fin du XVIIIe siècle, la chimie progresse lentement. Le contraste avec la physique et l'astronomie est d'ailleurs frappant : il est clair que beaucoup de chimistes (si on peut les appeler ainsi)

³ Comparer avec la citation de Claude Bernard contre les "philosophes", p. 4.4.

des XVII^e et XVIII^e siècles n'avaient pas senti le vent de la révolution scientifique, qu'ils n'étaient tout simplement pas au fait, ou ne comprenaient pas, les changements importants survenus dans les "sciences exactes". Il est difficile de dresser un portrait simple de la chimie à cette époque, tout encombrée qu'elle est encore de notions alchimiques. Mentionnons seulement quelques noms.

Van Helmont Le Belge Jan Baptist VAN HELMONT (1577/1644) insiste sur l'importance de mesures exactes. Il est surtout connu pour sa "découverte" des gaz, c'est-à-dire pour avoir découvert des substances à l'état gazeux clairement différentes de l'air atmosphérique, en particulier le gaz carbonique (CO₂) qu'il nomme "gaz sylvestre". Il est d'ailleurs à l'origine du mot *gaz*⁴

Boyle et Hooke Les contributions les plus importantes à l'étude des gaz au XVII^e siècle sont l'oeuvre de Robert BOYLE et de Robert HOOKE. Dans ses ouvrages *The Sceptical Chymist* et *Certain physiological essays* (1661), Boyle soutient que la matière est faite de particules microscopiques en mouvement (les atomes). On cite souvent la définition que Boyle a donné d'un *élément* et d'un *composé* : les éléments sont des substances homogènes en lesquelles les composés peuvent être réduits. Or Boyle s'efforce justement de combattre les notions d'*éléments* et de *principes* véhiculées par l'alchimie, en les remplaçant par une théorie atomique s'insérant dans la nouvelle philosophie mécanique : La matière est faite de particules qui diffèrent en grandeur et en forme ; les substances étudiées par les chimistes ne sont que des combinaisons de ces particules, mais on ne peut classer ces dernières en éléments, selon lui. On voit ainsi comment Boyle, voulant se rapprocher de la science cartésienne, sacrifie les notions utiles d'élément et de composé. Boyle est aussi célèbre pour sa loi des gaz (cf. p. 6.2.2). Boyle peut être considéré comme le véritable fondateur de la chimie physique. Il étudie les densités spécifiques, et découvre que l'air est nécessaire à la combustion. Robert Hooke, collaborateur de Boyle et rival de Newton, fait plusieurs expériences avec des machines pneumatiques et conclut, comme Guericke, que l'air est nécessaire à la vie. Il émet l'hypothèse que l'air contient un "solvant" nécessaire à la combustion.

Stahl et le phlogistique L'idée de la nécessité d'un "solvant" à la combustion est reprise par Johann BECKER (1635/1682) dans *Physicae subterraneae* et, surtout, par Georg STAHL (1660/1734). Dans son livre *les fondements de la chimie* (1723), Stahl précise le but de la chimie : l'*analyse* et la *synthèse* des substances. Autrement dit, décomposer les substances en leurs éléments et les recomposer à partir de leurs éléments. Stahl donne le coup d'envoi à la théorie du *phlogistique*, selon laquelle toute substance combustible possède une certaine quantité de phlogistique (*phlogiston* (φλογιστον) signifie "brûlé"), sorte de "principe léger", substance de poids négatif ! La combustion chasse le phlogistique du corps (on dit qu'il est "déphlogistiqué"). Par exemple, lorsqu'on calcine un métal – c'est-à-dire qu'on le chauffe en présence d'air – on le transforme en terre (c.-à-d. en oxyde) et le produit est plus lourd qu'au départ car le phlogistique, principe léger, en a été chassé ! Le charbon est une substance faite de phlogistique presque pur, car quand on chauffe une terre (un oxyde de métal) en présence de charbon, il lui restitue son phlogistique et la rend à l'état métallique.⁵ La théorie du phlogistique va malheureusement retarder la compréhension des réactions chimiques jusqu'aux travaux de Lavoisier.

Un précurseur : Lomonossov Il arrive parfois, dans l'histoire des sciences, que des travaux importants et originaux n'aient pratiquement pas d'impact sur la communauté scientifique, en raison soit de leur faible diffusion, de l'isolement de leur auteur, de l'incompréhension des contemporains, ou des trois à la fois ! L'un des cas les plus navrants est celui du grand chimiste russe Mikhail Vassilievitch LOMONOSOV (1711/1765). Après une enfance rude (il était le fils d'un simple pêcheur), Lomonossov parvient à faire des études avancées à l'Université de Marbourg, en Allemagne. Il devient membre de l'académie de Saint-Petersbourg en 1741 et fonde l'Université de Moscou, qui porte maintenant son nom, en 1755. Lomonossov est plus qu'un chimiste : c'est un esprit universel, un historien et un écrivain (l'un des véritables fondateurs de la littérature russe).

En chimie, il s'emploie à effectuer les mesures les plus précises possibles et prend bien soin de noter les conditions dans lesquelles l'expérience est effectuée :

Celui qui veut faire des expériences physico-chimiques doit se servir [...] de poids et mesures.

⁴Deux hypothèses sont formulées sur l'étymologie du mot : La première suppose qu'il vient du néerlandais *gaesen*, qui veut dire "fermenter". La seconde suggère que le mot tire son origine du grec *chaos* (χαος), qui veut dire notamment gouffre, ténèbres, désordre.

⁵En langage moderne : le carbone du charbon se combine à l'oxygène de l'oxyde et laisse le métal natif, plus du CO₂.

[...] Pour toutes les expériences indiquées, j'observerai et j'inscrirai non seulement les opérations, les poids et la nature des matières et récipients utilisés, mais aussi toutes les circonstances qui apparaîtront importantes.

En raison de sa méthode rigoureuse, Lomonossov parvient à affirmer le principe de la conservation de la masse et envisage un principe similaire pour les forces vives (l'énergie cinétique) :

Tous les changements ayant lieu dans la nature sont tels que tout ce qui est enlevé à un corps s'ajoute à un autre. Si la matière diminue dans un endroit, elle augmentera d'autant ailleurs ; les heures de veille sont prises au sommeil. Cette loi générale de la Nature s'étend aux règles du mouvement, car un corps qui par sa force met en mouvement un autre corps en perd autant qu'il en transmet à l'autre corps qui reçoit de lui le mouvement.⁶

Lomonossov fait aussi figure de précurseur de la théorie atomique et de la théorie cinétique des gaz. Par ailleurs, il nota dès 1745 la constance des angles formés par les différentes faces des cristaux pour un composé donné ; il est donc également un précurseur de la cristallographie.

Cependant, ses idées arrivent trop tôt et soulèvent l'hostilité des chimistes allemands, les plus attachés à la théorie du phlogistique. L'influence de Lomonossov reste donc confinée à la Russie, pays relativement inculte sur le plan scientifique à cette époque : on ne trouve pas trace de ses travaux dans les publications allemandes ou françaises du XVIII^e siècle.

7.2.2 La composition de l'air

Black et le gaz carbonique Jusqu'au milieu du XVIII^e siècle, on croit encore que l'air est une substance simple, un élément. Joseph BLACK (1728/1799), à la suite d'une série d'expériences sur les bases (1756), découvre une autre sorte d'air qu'il appelle *air fixe* : c'est le gaz carbonique (CO₂). Plus précisément, il chauffe de la *magnesia alba* (MgCO₃) et trouve qu'elle se décompose en magnésie (MgO) et en air fixe :



À l'inverse, quand la magnésie est placée en présence du même gaz, qui est plus rare dans l'air commun, elle redevient de la *magnesia alba*. Il trouve que cette réaction opère plus rapidement avec l'air provenant de la respiration et de la combustion. C'est le *gaz sylvestre* de Van Helmont que Black redécouvre, mais sa caractérisation est plus précise : le gaz de Van Helmont était surtout, mais pas uniquement, du gaz carbonique. Black découvre aussi que l'air fixe forme un précipité (du carbonate de calcium) lorsque mis en contact avec la chaux morte :



Il observe que cette réaction se produit lorsqu'on souffle sur la chaux et en conclut que l'air fixe est un produit de la respiration.

Cavendish En 1766, Henry CAVENDISH (1731/1810), chercheur solitaire et excentrique, découvre un nouveau gaz qu'il appelle *gaz inflammable* : c'est l'*hydrogène* (H₂). Cavendish produit de l'hydrogène en traitant des métaux (zinc, fer, étain) avec de l'acide sulfurique ou chlorhydrique, créant un sel métallique et un gaz. Il observe que ce gaz s'enflamme violemment. Plusieurs chimistes identifient alors ce gaz au phlogistique ! Cavendish étudie aussi l'air fixe, mesure sa densité, etc. Il étudie aussi les gaz provenant de la fermentation et de la putréfaction. Signalons les contributions de Cavendish à la physique : il mesure la constante de gravitation *G* à l'aide d'une balance à torsion et se trouve ainsi à "peser" la Terre et déduire sa densité moyenne. Il effectue aussi la même expérience que Coulomb sur les forces électriques, mais ses travaux demeureront inconnus pendant un siècle !

Priestley L'Anglais Joseph PRIESTLEY (1733/1804), pasteur anglican devenu chimiste amateur (il n'avait pas de formation de chimiste), va en quelques années isoler plus de gaz nouveaux que personne avant lui. Il montre que la respiration diminue le volume d'air, que la vie animale est impossible dans l'air "vicié" ainsi obtenu, mais qu'une plante finit par restaurer le volume initial d'air. Il découvre l'*air nitreux* (bioxyde

⁶Lomonossov : lettre à Euler, datée du 5/7/1748.

d'azote NO_2), l'air nitreux déphlogistiqué (protoxyde d'azote, ou oxyde nitreux N_2O), l'air alcalin (ammoniac), etc. En tout, il découvre une dizaine de sortes d'"air". Sa plus importante découverte est l'air déphlogistiqué, qu'on appelle maintenant *oxygène* (O_2). Il produisit ce gaz (1774) en chauffant, à l'aide d'une loupe, de l'oxyde de mercure dans un récipient scellé. Il observa que cet air accélère la combustion. Sachant qu'une souris enfermée sous une cloche hermétique ne vit pas très longtemps, il observa que le même animal pouvait vivre deux fois plus longtemps quand l'air ordinaire est remplacé par l'air déphlogistiqué. Priestley adhéra à la théorie du phlogistique : il appela l'oxygène "air déphlogistiqué" parce qu'il croyait qu'il s'agissait d'air ordinaire auquel on avait enlevé une part de son phlogistique, de sorte qu'il était plus propre à enlever le phlogistique aux autres substances, c'est-à-dire à effectuer la combustion. Il découvre aussi que l'oxygène et l'hydrogène (air inflammable) se combinent pour donner de l'eau très pure.

Du côté politique et même religieux, Priestley avait des vues libérales et dérangeantes. Il supportait la Révolution française, contrairement à la majorité de ses compatriotes. Ses positions lui attirèrent l'hostilité de la population et des notables. Le 14 juillet 1791, deuxième anniversaire de la prise de la Bastille, une émeute se déclencha à Birmingham ; la maison et le laboratoire de Priestley furent la première cible des émeutiers, qui saccagèrent le tout. Priestley dut fuir à Londres et, en 1794, émigrer aux États-Unis.

Scheele La recherche sur les gaz est manifestement un sujet chaud en cette deuxième moitié du XVIII^e siècle. Parallèlement aux travaux mentionnés ci-dessus, le Suédois SCHEELE isole l'hydrogène en 1768, découvre l'oxygène en 1773 (avant Priestley), ainsi que le chlore. Il démontre, en plus, que le graphite est une forme de carbone. Il découvre l'acide fluorhydrique (1771), l'acide cyanhydrique (1782) et la glycérine (1779). Il étudie aussi la chaleur radiante, comme mentionné au chapitre précédent. Il appelle l'oxygène *Feuer Luft* (air de feu), mais interprète quand même la combustion à l'aide de la théorie du phlogistique.

7.2.3 Lavoisier

Antoine-Laurent de LAVOISIER (1743/1794) est souvent considéré comme le père de la chimie moderne. Les trois principales contributions de Lavoisier à la chimie sont les suivantes :

1. L'introduction de méthodes *quantitatives* précises et systématiques, en particulier les mesures de poids (et de volume, pour les gaz), de température, de pression, etc.
2. Une nouvelle théorie de la *combustion*, basée sur les combinaisons chimiques de l'oxygène, et le rejet de la théorie du phlogistique.
3. Le renouvellement de la nomenclature chimique.

Lavoisier, s'il n'est pas le premier à effectuer des mesures de poids lors de ces expériences, le fait de manière si précise et systématique qu'il mérite d'être considéré comme l'initiateur de la chimie quantitative. Après plusieurs expériences précises réalisées dans des vaisseaux permettant de mesurer les poids et volumes des réactants et des produits, il en vient à formuler le principe de *conservation de la masse* : "Rien ne se perd, rien ne se crée".⁷

Les expériences de Lavoisier sur la combustion Lavoisier n'a pas découvert l'oxygène, mais en a élucidé le rôle dans la combustion. Mentionnons l'expérience suivante (l'appareil est illustré à la figure 7.1). Dans un premier temps, Lavoisier chauffe de l'oxyde de mercure (HgO) dans un ballon (A), en présence de charbon. L'oxyde, une poudre rougeâtre, se transforme graduellement en mercure métallique et un gaz est produit et recueilli en (C). Ce gaz est caractérisé par Lavoisier, qui conclut qu'il s'agit d'air fixe : il est assez soluble dans l'eau, éteint une flamme, asphyxie des petits animaux et précipite la chaux morte, comme en (7.2). En langage moderne, la réaction étudiée dans ce cas-ci est



En un deuxième temps, il répète l'expérience, mais en omettant le charbon. Le mercure retourne encore à l'état métallique, mais le gaz recueilli est radicalement différent : il est peu soluble dans l'eau, facilite la

⁷Le Français Jean REY (1583/1645) affirma, dans un ouvrage publié en 1630, que l'augmentation de poids des métaux qu'on calcine peut être attribuée à ce qu'une partie de l'air environnant s'y fixe. Il fait donc figure de précurseur du principe de conservation de la masse. Cependant, Rey n'ayant procédé à aucune expérience pour démontrer ses dires, on ne peut enlever à Lavoisier la paternité de ce principe.

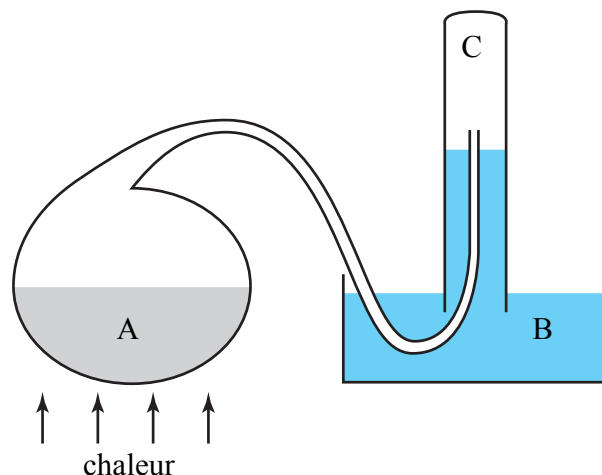


FIG. 7.1 : Schéma de l'appareil utilisé par Lavoisier dans ses expériences sur la combustion. Le ballon (A) contient le produit chauffé (Hg ou HgO selon le cas, avec ou sans charbon) et les gaz produits sont recueillis en C et leur volume peut être mesuré.

combustion et la respiration des animaux. Ce gaz semble être une forme “purifiée” d’air commun. C’est l’air déphlogistiqué de Priestley. La réaction étudiée est en fait



Manifestement, le charbon se combine à cet air déphlogistiqué pour former de l’air fixe. Lavoisier procède à une troisième expérience, plus convaincante : il procède à un chauffage lent (sur une dizaine de jours) d’un ballon de mercure métallique (A), à l’aide du même appareil (Fig. 7.1). Le mercure bout doucement, en présence de l’air initialement contenu dans le ballon. Or, il apparaît des grains rougeâtres d’oxyde de mercure (HgO) et le volume d’air du ballon diminue d’un sixième environ. Ceci se mesure à la hauteur de la colonne d’air C, étant donné que le bassin B est rempli d’eau. L’air restant ne peut entretenir la vie : Lavoisier l’appelle *mofette atmosphérique*⁸ mais on l’appelle bientôt *azote*, du grec *zôê* (ζωή) qui veut dire “vie”, précédé d’un ‘a’ privatif. Lavoisier recueille ensuite les particules d’oxyde de mercure, les chauffe vivement, comme lors de la deuxième expérience ci-dessus, recueille le gaz produit et constate qu’il correspond au volume d’air perdu lors de l’étape précédente. Il constate de plus que la masse du mercure métallique produit est inférieure à celle de l’oxyde de départ, masse attribuée à l’air déphlogistiqué produit par la réaction.

La conclusion la plus immédiate de cette dernière expérience est que la formation de l’oxyde de mercure résulte d’une combinaison avec l’air déphlogistiqué qui constitue une partie de l’air commun, et non d’une émission de phlogistique par le mercure métallique. En effet, la théorie du phlogistique ne peut expliquer pourquoi la réaction sature quand le volume de l’air a diminué d’environ 1/6, alors qu’il resterait amplement de mercure (et de phlogistique) pour lui permettre de continuer. Il est beaucoup plus simple de supposer que le mercure se combine avec l’air déphlogistiqué pour former l’oxyde ($2\text{Hg} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{HgO}$), ce qui explique la saturation de la réaction, ainsi que l’augmentation de la masse de l’oxyde par rapport au mercure correspondant.

Dans ses expériences ultérieures, Lavoisier démontre que l’air déphlogistiqué est un constituant de nombreux acides et pour cette raison le renomme *oxygène* (du grec *oxus* (οξύ), pour “vinaigre”). En fait, il croit que l’oxygène est un constituant obligé de tous les acides (ceci constitue l’une de ses erreurs).

En 1783, Lavoisier découvre, en faisant passer de la vapeur dans un tuyau de fer chauffé au rouge, que cette vapeur d’eau se décompose en oxygène et en air inflammable, qu’il renomme à l’occasion *hydrogène* (du préfixe grec *hydro-* (υδρο-) pour “eau”). L’hydrogène s’échappe à l’autre extrémité du tuyau, alors que

⁸Le mot *mofette* désigne un air vicié. Le mot *moufette* (putois) y est apparenté.

l'oxygène se combine au fer du tuyau pour former un oxyde. Les deux gaz (oxygène et hydrogène) se recombinent pour former de l'eau, comme observé auparavant par Cavendish. Notons cependant que Cavendish considérait le même processus comme un simple échange de phlogistique ; selon lui, l'oxygène est de l'eau déphlogistiquée et l'hydrogène de l'eau comportant un surplus de phlogistique, de sorte que la réaction $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$ est interprétée par lui comme



(ϕ désigne le phlogistique). Cavendish et Priestley n'accepteront jamais la théorie de Lavoisier sur la combustion et resteront jusqu'à la fin des partisans du phlogistique. Notons que la fabrication de l'hydrogène permit en 1783 au physicien Jacques CHARLES (1746/1823) de remplacer par ce gaz, très léger, l'air chaud utilisé dans les ballons des frères Montgolfier, récemment inventés. Les ballons purent alors s'élever plus haut et plus longtemps. En 1785, Jean-Pierre BLANCHARD put même traverser la Manche à l'aide d'un ballon à hydrogène.

Entre 1782 et 1784, Lavoisier procède, avec l'aide de Laplace, à une série d'expériences de calorimétrie qui tendent à démontrer que la respiration est un processus de combustion. À l'aide d'un calorimètre à glace, ils mesurent la quantité de chaleur dégagée par un cochon d'inde (cobaye) ainsi que la quantité de gaz carbonique dégagée par sa respiration. Ils refont les mêmes mesures en remplaçant le cobaye par la combustion directe de charbon et arrivent à la conclusion que, à volume égal de gaz carbonique produit, les deux processus ont dégagé la même quantité de chaleur, à 20% près (acceptable, compte tenu de la faible précision des mesures calorimétriques du temps). Ils concluent, correctement, que la respiration est un processus de combustion qui consomme de l'oxygène et produit du gaz carbonique.

Cependant, Lavoisier considère toujours la chaleur comme une substance et lui donne le nom de *calorique*. Il voit donc les changements d'états comme des transformations chimiques : la fusion est le résultat de la combinaison du solide avec le calorique, et la vaporisation est le résultat d'une combinaison additionnelle de calorique avec le liquide.

La nomenclature chimique L'absence de nomenclature standard et la diversité des noms traditionnels souvent portés par un même composé compliquaient énormément le travail des chimistes et compromettaient la précision de leurs communications. En 1787, Lavoisier, à l'aide de ses collègues Claude BERTHOLLET (1748/1822), Louis Bernard GUYTON DE MORVEAU (1737/1816) et Antoine de FOURCROY (1755/1809), publie une *nouvelle méthode de nomenclature chimique*. Dans cette nomenclature, les noms anciens des composés sont abandonnés, car ils ne contiennent que très peu d'information sur la nature du composé et plusieurs noms désignent parfois la même substance. Les terminaisons suivantes sont préconisées :

1. -ique pour les acides saturés d'oxygène. Par exemple, l'oxyde plombique PbO .
2. -ite pour les sels des "-eux", qui contiennent moins d'oxygène. Par exemple, le radical sulfite SO_3 se retrouve dans l'acide sulfureux H_2SO_3 et dans le sulfite de sodium Na_2SO_3 .
3. -ure pour un composé non acide, ne contenant pas du tout d'oxygène selon Lavoisier, tels le chlorure de sodium NaCl .
4. -ide pour les oxydes des métaux.

Par exemple, dans le tableau suivant, la nomenclature suit le système de Lavoisier et désigne les différents ions de chlore selon leur teneur en oxygène, de même que les acides correspondants :

ion			acide
perchlorate	ClO_4^-	HClO_4	acide perchlorique
chlorate	ClO_3^-	HClO_3	acide chlorique
chlorite	ClO_2^-	HClO_2	acide chloreux
hypochlorite	ClO^-	HClO	acide hypochloreux
chlorure	Cl^-	HCl	acide chlorhydrique

Ainsi, la *poudre d'algaroth* devient un oxychlorure d'antimoine ; le *colcotar*, de l'oxyde ferreux (Fe_2O_3) ; le *sel de Glauber*, un sulfate de sodium hydraté ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10(\text{H}_2\text{O})$) ; le *sel d'Epsom*, un sulfate de magnésium hydraté ; l'*huile de vitriol*, de l'acide sulfurique (H_2SO_4) ; l'*orpiment* et le *réalgar*, des sulfures d'arsenic, etc.

En 1789, Lavoisier publie son *Traité élémentaire de chimie*, dans lequel il explique sa "nouvelle chimie". Il y donne la liste des éléments reproduite au tableau 7.1. Il y publicise le mot "gaz" pour désigner les "airs". Ce traité aura une très grande diffusion et sera rapidement traduit en d'autres langues.

La fin de Lavoisier Lavoisier ne fit pas que de la recherche fondamentale, loin de là. En 1775 il fut nommé *régisseur des poudres*, avec comme mission d'améliorer la poudre à canon française, l'une des moins efficaces en Europe à l'époque. Lavoisier en fit la meilleure d'Europe. Comme il faut bien vivre, Lavoisier acheta des parts dans la *Ferme générale*. Cette compagnie privée procédait à la collecte des impôts pour le compte du roi et prélevait naturellement son pourcentage. Elle disposait d'un mur entourant la ville de Paris (le mur des fermiers généraux) qui lui permettait de contrôler le flot des marchandises. Les fermiers généraux s'attirèrent naturellement l'hostilité de la population et ils furent exécutés pendant la Terreur, en 1794. Lavoisier périt donc sur la guillotine, ce qui fit dire à Lagrange : "Il ne leur a fallu qu'un instant pour lui trancher la tête, mais une centaine d'années n'en produira peut-être pas une semblable."

7.3 L'hypothèse atomique

L'idée que la matière est composée de particules microscopiques remonte aux philosophes d'inspiration pythagoricienne, en particulier LEUCIPPE et surtout DÉMOCRITE D'ABDÈRE. Ces idées furent plus tard propagées par les philosophes de l'école épicurienne, en particulier par le Romain LUCRÈCE (Titus Lucretius Carus, -98 / -55) dans son poème *de rerum natura* (de la Nature). Mais les idées vagues des Grecs à ce sujet ne méritent pas le nom de théorie, encore qu'elles préfigurent la philosophie mécanique de Descartes. Au XVII^e siècle, Robert Boyle croyait que les gaz étaient composés de particules microscopiques en agitation. Au début du XVIII^e siècle, Daniel Bernoulli expliquait la pression des gaz par les collisions de ces particules avec les parois. Newton croyait aussi que la matière était constituée de particules microscopiques, liées entre elles par des forces d'attraction. Toutes ces idées, cependant, ne disent rien sur la relation entre un composé et ses composants, bref, sur la chimie.

7.3.1 L'hypothèse atomique et l'étude des gaz

Les proportions définies À partir des mesures précises de Lavoisier et d'autres chimistes de la fin du XVIII^e siècle, il devint de plus en plus clair que les réactions chimiques se produisaient toujours en proportions fixes des réactants. Autrement dit, le rapport des masses des réactants est toujours le même s'ils se transforment complètement. Par exemple, à 2 g d'hydrogène s'unissent toujours 16 g d'oxygène pour former de l'eau. Cette loi des proportions définies (1806) a été formalisée et défendue le plus activement par Joseph Louis PROUST (1754/1826), qui s'opposait en cela à Berthollet. Ce dernier appuyait son opposition à cette "loi" en citant des réactions où elle n'était manifestement pas valable, mais il se trouve que ces réactions impliquaient des alliages (mélanges de métaux).

Dalton C'est l'Anglais John DALTON (1766/1844) qui est connu comme le père de la théorie atomique, et à juste titre. Dalton émit son hypothèse atomique en 1803 et publia son *New System of Chemical Philosophy* entre 1808 et 1827. Dalton n'était pas un chimiste de formation et c'est via la météorologie qu'il s'intéressa à la composition des gaz. Sa première découverte d'importance est que la vapeur d'eau ne se combine pas chimiquement à l'air comme un composé, contrairement à ce que croyait Lavoisier. Au contraire, l'humidité de l'air est le résultat d'un mélange de vapeur d'eau avec les gaz (azote et oxygène, principalement) qui forment l'air sec. C'est alors qu'il formula la loi des *pressions partielles*, déduite de l'observation de la pression de vapeur avant et après son mélange avec l'air. Cette loi stipule que chaque partie d'un mélange gazeux exerce une pression sur les parois comme si les autres parties du mélange étaient absentes et que la pression totale du mélange est simplement la somme arithmétique des pressions partielles des parties du mélange.

TAB. 7.1: Tableau des éléments du traité élémentaire de chimie de Lavoisier (1789).

Noms nouveaux	Noms anciens correspondants
Substances simples qui appartiennent aux trois règnes et qu'on peut regarder comme les éléments des corps.	
Lumière	Lumière
Calorique	Chaleur – Principe de la chaleur – Fluide igné – Feu – Matière du feu et de la chaleur
Oxygène	Air déphlogistiqué – Air empiréal – Air vital – Base de l'air vital
Azote	Gaz phlogistiqué – Mofète – Base de la Mofète
Hydrogène	Gaz inflammable – Base du gaz inflammable
Substances simples non métalliques, oxydables et acidifiables.	
Soufre	Soufre
Phosphore	Phosphore
Carbone	Charbon pur
Radical muriatique	(inconnu)
Radical fluorique	(inconnu)
Radical boracique	(inconnu)
Substances simples métalliques, oxydables et acidifiables.	
Antimoine	Antimoine
Argent	Argent
Arsenic	Arsenic
Bismuth	Bismuth
Cobalt	Cobalt
Cuivre	Cuivre
Etain	Etain
Fer	Fer
Manganèse	Manganèse
Mercure	Mercure
Molybdène	Molybdène
Nickel	Nickel
Or	Or
Platine	Platine
Plomb	Plomb
Tungstène	Tungstène
Zinc	Zinc
Substances simples salifiables terreuses.	
Chaux	Terre calcaire – chaux
Magnésie	Magnésie – base du sel d'Epsom
Baryte	Barote – terre pesante
Alumine	Argile – terre de l'alun – base de l'alun
Silice	Terre silicieuse – terre vitrifiable

Dalton découvre aussi la *loi des proportions multiples* : quand deux éléments, par exemple le carbone et l'hydrogène, peuvent se combiner de différentes manières pour former des composés différents (comme le CO et le CO₂), les masses de l'un des réactants (l'autre réactant étant en quantité fixe) sont en proportions numériques simples dans les différentes réactions. Par exemple, pour une masse de carbone donnée, il faut deux fois plus d'oxygène pour former le CO₂ que le CO. Cette découverte vient renforcer la loi des proportions définies de Proust.

De ses observations sur les pressions partielles, qui s'expliquent facilement par l'hypothèse que les gaz sont formés de particules agitées, et de la loi des proportions définies, Dalton arriva naturellement à l'hypothèse que les différents éléments sont composés de particules indivisibles, toutes identiques (les atomes) et que les composés sont formés aussi de particules microscopiques (les molécules) obtenues en combinant les atomes des éléments correspondants d'une manière fixe, en des proportions conséquemment toujours identiques. Il développa ces idées à partir de 1803 et assigna un poids relatif à chaque atome (les poids de Dalton sont souvent entachés d'erreurs). Bien sûr, la théorie de Dalton ne lui permettait pas de connaître la masse exacte (ou la taille) des atomes et ses combinaisons d'atomes ne correspondaient pas toujours à nos molécules modernes. Par exemple, le composé C₂H₄ était pour lui la combinaison d'un atome de carbone et de deux atomes d'hydrogène, car seules les proportions comptaient pour lui.

L'hypothèse d'Avogadro A posteriori, l'argument le plus fort en faveur de l'hypothèse atomique à l'époque est l'une des lois découvertes par Louis-Joseph GAY-LUSSAC (1778/1850) sur les volumes des réactants gazeux (1808). Gay-Lussac découvrit que, lors des réactions chimiques complètes, les gaz se combinent en des rapports de volume simples (à la même température et la même pression). Gay-Lussac observa que cette découverte supportait la théorie de Dalton, mais ajouta des nuances de manière à ne pas froisser son supérieur, Berthollet !

Les combinaisons observées par Gay-Lussac étaient parfois déroutantes. Par exemple, il observa qu'un volume d'oxygène réagit avec deux volumes d'hydrogène pour donner *deux* volumes de vapeur d'eau. Mais si on suppose, comme Dalton, que les gaz hydrogène et oxygène sont formés d'atomes individuels, on s'attendrait plutôt à obtenir un seul volume de vapeur d'eau, en vertu de la réaction schématisée suivante :



Pour expliquer cette anomalie, le comte italien Amedeo AVOGADRO (1776/1856) propose que les gaz hydrogène et oxygène sont en fait constitués de *molécules*, c'est-à-dire des combinaisons de plusieurs atomes de la même espèce. Ainsi, les résultats de Gay-Lussac sur la synthèse de la vapeur d'eau s'expliquent, si on suppose que les réactants sont des gaz diatomiques :



Avogadro est donc l'auteur du concept de molécule, qu'il intégra aux observations de Gay-Lussac pour formuler sa célèbre hypothèse, que *des volumes égaux de gaz à la même pression et température contiennent des nombres égaux de molécules*. Cette hypothèse sera proposée indépendamment par Ampère en 1814. Elle explique la loi de Gay-Lussac si on accepte l'existence des atomes et des molécules.

Malheureusement, l'hypothèse d'Avogadro, si féconde, ne fut pas acceptée par la majorité de la communauté des chimistes, en raison de son appel à des entités inobservables (les atomes). Jusqu'en 1860, la détermination des poids moléculaires sera l'un des problèmes principaux de la chimie et de multiples controverses et hypothèses contradictoires verront le jour. En 1858, Stanislas CANNIZZARO (1826/1910) suggère de retourner à l'hypothèse d'Avogadro, formulée 47 ans auparavant, pour déterminer les poids moléculaires. Cette façon de procéder est progressivement acceptée après le congrès de Karlsruhe en 1860.

Du point de vue de la théorie cinétique des gaz, développée plus tard, il est assez évident que deux gaz à la même température et pression comptent le même nombre de molécules. Il est également clair que chaque atome d'un solide possède la même capacité calorifique et que, par conséquent, la capacité calorifique par unité de masse d'une substance varie en raison inverse de la masse de chaque atome. Cette propriété, découverte expérimentalement par DULONG et PETIT en 1819, ne sera comprise que par Maxwell cinquante ans plus tard. Malheureusement pour l'hypothèse atomique, la théorie était alors en retard sur l'expérience.

En fait, avant la théorie cinétique, on s'imaginait que chaque atome ou molécule était entouré d'un nuage de calorique et que ce calorique était à l'origine de la chaleur dégagée au cours des réactions chimiques. D'ailleurs, ce nuage de calorique était relié d'une certaine façon aux affinités entre éléments différents, et "expliquait" pourquoi certaines combinaisons chimiques ont lieu et d'autres pas. Encore une fois, ce modèle n'était qu'un support à l'imagination dans la détermination des "tables d'affinité" entre différents éléments.

7.3.2 L'électrolyse

Davy La découverte de l'électrolyse sera le facteur le plus déterminant dans le progrès de la chimie au début du XIXe siècle. Le véritable pionnier de cette technique est l'Anglais Humphry DAVY (1778/1829). Davy débute comme assistant d'un médecin de province, mais est congédié par celui-ci à cause de son goût prononcé pour les expériences "explosives". Il s'intéresse par la suite à la machine à vapeur et aux divers gaz. Il expérimente sur lui-même l'air nitreux déphlogistiqué de Priestley (N_2O) qu'il appelle *laughing gas* (gaz hilarant) à cause de ses effets particuliers ! Cette découverte est à l'origine d'un nouveau problème de toxicomanie : il devient à la mode dans les salons de se divertir en inhalant du gaz hilarant (on l'utilise alors aussi pour les anesthésies). En 1806, Davy, qui est directeur de la *Royal Institution*, découvre l'électrolyse, constate que les métaux se rassemblent au pôle négatif (cathode) et l'oxygène et les acides au pôle positif (anode). Il conclut que l'électricité vainc l'affinité naturelle entre les éléments et peut donc dissocier les composés. Il en déduit que l'affinité entre les éléments est de nature électrique (ce en quoi il a parfaitement raison). En 1807, il parvient à décomposer des substances alcalines qu'on croyait être des éléments jusqu'alors et isole le sodium et le potassium. En 1808, il isole le magnésium, le calcium, le strontium et le barium. Le rapport des poids des produits de l'électrolyse sont également dans des proportions définies, ce qui supporte l'hypothèse atomique.

Faraday Nous avons mentionné plus haut que Davy recruta Faraday et que celui-ci lui succéda à la *Royal institution*. Au cours d'un voyage en France (autorisé expressément par Napoléon alors que la guerre contre l'Angleterre faisait rage), Davy et Faraday discutèrent avec Gay-Lussac et Louis Thénard, les spécialistes français de l'électrochimie. Ceux-ci leur firent part de leur soupçon que la vitesse de décomposition de l'électrolyte ne dépendait pas de la nature des électrodes, mais uniquement de la quantité de courant électrique passant par la batterie. Stimulé par ce voyage, Faraday poursuivit les travaux de Davy sur l'électrolyse et, plus tard, en énonça les lois :

1. La quantité de matière produite par unité de temps par électrolyse est proportionnelle au courant électrique qui circule dans le bassin.
2. Les produits de l'électrolyse apparaissent en des proportions identiques à celles observées, pour les mêmes composés, dans des réactions chimiques ordinaires (les équivalents électrochimiques sont les mêmes que les équivalents chimiques).⁹

Davy et Faraday eurent l'intuition que les atomes contenaient une certaine électricité et que cette électricité jouait un rôle capital dans les réactions chimiques. Citons Faraday : "Les atomes dans la matière sont d'une certaine façon dotés de pouvoirs électriques ou associés à de tels pouvoirs, auxquels ils doivent leurs propriétés les plus frappantes et, parmi celles-ci, leur affinité chimique." L'avenir leur donna raison.

Berzélius D'autres chimistes utilisèrent à profit l'électrolyse, dont le Suédois Jöns Jakob BERZÉLIUS (1779/1848), qui réussit à isoler d'autres éléments (silicium, sélénium, thorium, zirconium) et élaborer une théorie électrique des interactions chimiques, théorie qui dominera une partie du siècle. Selon cette théorie, qualifiée de *dualiste*, chaque substance inorganique est composée de deux parties, portant des charges électriques opposées, liées par leur attraction électrique. L'opposition entre acides et bases, entre oxydants et réducteurs, entre métaux et isolants, était vue comme une manifestation de ce dualisme. Cette théorie, un peu trop simpliste et parfois poussée à l'excès (comme en chimie organique), allait susciter des réactions négatives plus tard au cours du siècle ; mais elle contribua à faire de Berzélius le chef de file reconnu de la chimie à partir de 1820.

⁹En langage moderne, les lois de Faraday sur l'électrolyse s'expriment en fonction de la constante de Faraday F , qui donne la charge électrique d'une mole d'électrons, à savoir 96 485 kC.

Berzélius passa de longues années à tenter de déterminer les poids atomiques des différents éléments connus. Cependant, son rejet de l'hypothèse d'Avogadro lui rendit la tâche très difficile. Mais la contribution la plus durable de Berzélius est la notation sténographique encore utilisée de nos jours pour les composés et réactions chimiques (H_2O , CH_4 , etc.).

7.3.3 Le positivisme et les atomes

Pendant les deux premiers tiers du XIXe siècle, peu de chimistes ou de physiciens croient en la réalité des atomes, même s'ils constituent une manière simple d'expliquer les faits. Les scientifiques de cette époque se méfient généralement des théories faisant appel à des objets inobservables. Cette attitude est appelée *positiviste*. En gros, le *positivisme* est une doctrine philosophique qui stipule que la science doit se contenter d'observer les faits, sans tenter d'élaborer des théories faisant appel à des principes ou notions non directement observables. Même si cette opinion n'est pas nouvelle au début du XIXe siècle, le fondateur du positivisme comme système de pensée est Auguste COMTE (1798/1857). Celui-ci va plus loin et prétend que la pensée et la société humaines évoluent en trois stades successifs (et croissants) de développement :

1. Le stade théologique et militaire, caractérisé par une explication imaginative et surnaturelle des phénomènes (fétichisme, polythéisme, puis monothéisme).
2. Le stade métaphysique et légiste (modification du premier où les forces surnaturelles sont remplacées par des forces abstraites).
3. Le stade positif et industriel, où les hommes renoncent à chercher les causes profondes et l'essence des choses et se contentent de découvrir les lois effectives qui régissent les faits, par l'observation et le raisonnement.

Le positiviste strict fait preuve d'un manque de compréhension de ce que constitue un "fait". On ne peut faire une observation scientifique sans l'interpréter à l'aide d'une théorie, aussi élémentaire soit-elle, et cette théorie fait invariablement appel à des concepts qui ne sont pas directement observables. Ceci devint beaucoup plus clair avec le raffinement des instruments scientifiques, dont le fonctionnement et l'interprétation repose sur des concepts qui ne sont pas directement accessibles à nos sens, comme le champ magnétique, le potentiel électrique, etc. La méthode scientifique contemporaine ne se gêne pas pour introduire des concepts inaccessibles aux sens, si ces concepts permettent de simplifier notre compréhension des phénomènes en établissant des corrélations, des relations de nécessité entre ces phénomènes. Elle reste cependant fidèle au "rasoir d'Occam" et en fait même un de ses principes de base : ne pas introduire plus de concepts que nécessaire. On peut même ajouter : introduire des concepts plus "abstraites" s'ils permettent de réduire le nombre total de "concepts indépendants".

Toujours est-il que l'attitude positiviste retarda l'acceptation de la théorie atomique par la science du XIXe siècle. Citons comme exemple le chimiste Jean-Baptiste Dumas, qui affirme :

Si j'en étais le maître, j'effacerais le mot "atome" de la science, persuadé qu'il va plus loin que l'expérience ; et jamais, en chimie, nous ne devons aller plus loin que l'expérience.

L'idée d'atome ou de poids atomique fut de fait remplacée dans l'usage des chimistes par celle d'*équivalent*. L'équivalent d'un élément est la masse de cet élément, relative à une référence comme l'oxygène, qui réagit dans des proportions simples. Cette notion, due principalement à l'Allemand Jeremias Benjamin RICHTER (1762/1807), fut généralement adoptée au XIXe siècle et perfectionnée par le Français Charles GERHARDT (1816/1856). Le défaut de la notion d'équivalent est que les valences des éléments ne sont pas toujours les mêmes dans toutes leurs combinaisons chimiques. C'est l'acceptation définitive de l'hypothèse d'Avogadro après 1860 qui a permis de résoudre les problèmes de l'attribution des masses atomiques et d'introduire le concept de *molécule-gramme* (ou mole).

7.4 La chimie organique

7.4.1 La synthèse organique

L'analyse chimique a été appliquée au monde vivant dès la fin du XVIII^e siècle, au seuil de la révolution chimique. Les chimistes découvrent rapidement, au début du XIX^e siècle, que les êtres vivants sont fait des mêmes éléments que la matière inerte : la matière vivante n'est pas différente du reste quant à sa composition. Par exemple, en 1823, le chimiste français Eugène CHEVREUL (1786/1889) analyse les corps gras d'origine animale. Cependant, l'analyse chimique est une chose, la synthèse en est une autre. On croira longtemps, parmi les chimistes du début du XIX^e siècle, que la synthèse des composés organiques (c'est-à-dire les composés produits par les êtres vivants) est impossible à réaliser en laboratoire. On croit en fait que le phénomène de la vie ne peut être réduit aux seules lois de la physique et de la chimie et qu'un principe nouveau, différent, une *force vitale*, est nécessaire. Cette théorie a reçu le nom de *vitalisme*. Ainsi, la force vitale permettrait aux animaux de synthétiser, dans l'organisme, des composés chimiques particuliers qu'un chimiste dans son laboratoire ne pourrait recréer.

Or, en 1828, le chimiste allemand Friedrich WÖHLER (1800/1882) parvient à synthétiser l'urée : "Je peux faire de l'urée sans avoir besoin de reins ou même d'un animal, fut-il homme ou chien", dit-il. La découverte de Wöhler marque le point de départ véritable de la chimie organique et de plus en plus de synthèses organiques sont réalisées au milieu du XIX^e siècle. Le vitalisme semble en péril.

7.4.2 La stéréochimie

Les partisans du vitalisme reprennent espoir quand on constate l'impossibilité de la *synthèse asymétrique*. Premièrement, expliquons de quoi il s'agit, en langage moderne. Plusieurs molécules organiques existent en conformations opposées, obtenues l'une de l'autre par inversion spatiale, comme dans un miroir. On dit que ces molécules sont *chirales*, ou qu'elles sont des *énantiomères* d'un même composé (voir la Fig. 7.2, plus bas). La synthèse en laboratoire de ces composés produit généralement un mélange égal des deux conformations de la molécule (mélange dit *racémique*). Cependant, les organismes vivants ne produisent qu'une conformation sur les deux (toujours la même dans tout le monde vivant, pour un composé donné). La molécule de sucre (glucose) est l'exemple le plus connu. Une solution ne comportant qu'une conformation, ou un mélange des deux conformations dans des proportions inégales, a la propriété de produire une rotation de la polarisation de la lumière qui la traverse (on appelle ce phénomène *activité optique*). Vers les années 1840, avant que la notion de conformation d'une molécule occupe les esprits, l'activité optique de quelques composés organiques produits naturellement était connue, alors que les mêmes composés produits artificiellement ne montraient aucune activité optique.

Retraçons maintenant le fil de ces découvertes importantes. Au tournant du XIX^e siècle, l'abbé René-Just HAÛY (1743/1822), le fondateur de la cristallographie, avait noté que les cristaux de quartz (une substance tout-à-fait inorganique) existent en deux variétés, qui ne diffèrent que par l'orientation d'une de leur face, et que les deux formes (dites *énantiomorphes*) sont l'image miroir l'une de l'autre. En 1812, Jean-Baptiste Biot observa que les deux formes cristallines du quartz ont un pouvoir rotatoire sur la polarisation de la lumière.¹⁰ Dans un registre différent, maintenant, on connaissait depuis longtemps l'acide tartrique, produit naturellement dans les raisins et récolté comme un dépôt au fond des tonneaux de vin après fermentation. Or, cet acide tartrique est optiquement actif. Vers 1820, on synthétisa une forme d'acide tartrique au comportement légèrement différent, en ce qu'elle n'avait pas d'activité optique. Gay-Lussac nomma ce nouveau composé *acide racémique*¹¹, tandis que Berzélius le nomma *acide paratartrique*. En 1844, le chimiste allemand Eilhard MITSCHERLICH (1794/1863) synthétisa des sels à partir de ces acides et en étudia les cristaux. Il annonça que les deux sels avaient la même forme cristallographique et pourtant des propriétés optiques

¹⁰Notons que cet effet est bien distinct de la *biréfringence* : dans un cristal biréfringent, les deux polarisations de la lumière ont des indices de réfraction différents, ce qui mène généralement à une division d'un faisceau lumineux en deux. Dans le cristal actif, la polarisation linéaire incidente, obtenue au préalable par séparation à travers un cristal biréfringent, tourne dans l'espace en proportion de la distance parcourue dans le cristal.

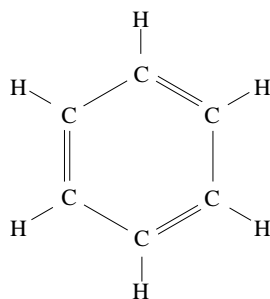
¹¹Du latin *racemus*, qui veut dire "raisin".

différentes. C'est à ce moment qu'entre en scène le grand chimiste français Louis PASTEUR (1822/1895). Pasteur craint que Mitscherlich ait conclut trop tôt à l'identité des deux formes cristallines. À l'aide d'un microscope, il examine les cristaux (plus précisément, les polycristaux) de sel racémique et découvre qu'ils sont un agrégat de deux formes cristallines énantiomorphes. Patiemment, il les sépare avec des pinces et peut ainsi isoler deux énantiomères du même composé.¹² Il découvre que cela n'est pas dû à la nature cristalline du composé, car des *solutions* des deux formes sont toutes les deux optiquement actives, et de surcroît dans des sens opposés ! Un mélange égal (dorénavant qualifié de *racémique*) des deux formes perd cette propriété. L'aspect qui fascinait le plus Pasteur était qu'une seule des deux formes – celle produite naturellement dans les raisins – était susceptible de fermentation. Au cours de la synthèse, les deux formes sont produites en quantité égales, mais la Nature n'en produit qu'une seule. Ce phénomène fut l'un des derniers arguments des vitalistes (dont Pasteur) en faveur de forces spéciales à l'oeuvre dans les être vivants. Cependant, la synthèse d'un énantiomère plutôt qu'un autre, ou *synthèse asymétrique*, est maintenant possible. Par exemple, on peut produire un sucre chimiquement identique au sucre naturel, mais de chiralité opposée.

7.4.3 La structure moléculaire

L'existence de composés *isomères*, c'est-à-dire ayant la même composition chimique, mais des propriétés différentes, fut révélée pour la première fois par Berzélius. Les composés énantiomères étudiés par Pasteur en sont un cas particulier, mais les isomères n'ont pas nécessairement d'activité optique. L'isomérisme posa un problème conceptuel particulier aux chimistes qui ne croyaient pas en l'existence effective des atomes. En fait, la compréhension de l'isomérisme à l'aide d'une structure ou conformation spatiale des molécules, dans les années 1860, fut le principal facteur dans l'acceptation par les chimistes de l'hypothèse atomique.

Étroitement liée à la notion de structure moléculaire est la notion de *valence*.¹³ Le concept de valence fut introduit principalement par le chimiste anglais Edward FRANKLAND (1825/1899), en 1852, comme le nombre de "liens chimiques" qu'un atome pouvait avoir avec ses voisins. Le concept ne pouvait que mener à des contradictions tant que les poids atomiques (et par conséquent le nombre précis d'atomes de chaque type dans une molécule) n'avaient pas été fermement établis ; ceci ne fut possible qu'après les travaux de Cannizzaro et le congrès de Karlsruhe (1860). Mais même avant ce congrès on s'entendait sur la valence 4 du carbone.



(7.8)

En 1858, l'Allemand August KÉKULÉ von STRADONITZ (1829/1896) proposa que les liens de valence sont des *réalités physiques et géométriques*. Il propose ensuite une série de formules structurales pour beaucoup de composés organiques. Il se bute cependant au problème du *benzène*, car il ne voyait pas comment la formule empirique CH du composé pouvait s'accomoder de la valence 4 du carbone et de la valence 1 de l'hydrogène, tout en maintenant la grande stabilité du composé (un carbone non saturé est possible pour Kékulé, mais s'accompagne d'une grande réactivité). Il résolut cette énigme en 1866 en proposant une

¹²On sait maintenant que Pasteur fut remarquablement chanceux dans cette découverte, car le même composé, s'il cristallise à une température plus élevée que 28°, forme un cristal complètement symétrique et inactif. À une température inférieure à 28°, il cristallise en deux formes qui s'enchevêtrent dans un polycristal, mais il est très rare que les grains soient assez gros pour être séparés manuellement, même avec l'aide d'un microscope (tout dépend des conditions de cristallisation, qui sont assez variables).

¹³Le mot vient du latin *valens*, qui veut dire "force".

structure hexagonale, dans laquelle six atomes de carbone forment un hexagone, chaque atome de carbone étant lié à un hydrogène et relié à l'un de ses voisins par un lien double et à l'autre par un lien simple. Kékulé racontait que cette idée lui est venue après un songe dans lequel il eut la vision d'un serpent qui se mord la queue.

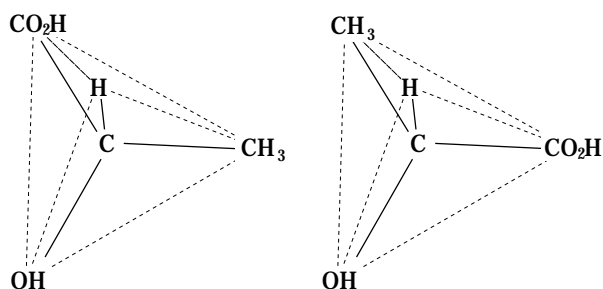


FIG. 7.2 : Deux molécules énantiomères, à structure tétraédrale, avec un atome de carbone au centre (acide lactique). La molécule de droite est obtenue par réflexion de celle de gauche, par rapport au plan passant par le carbone et par les radicaux H et OH. Par contre, elle n'est pas équivalente à une rotation de celle de gauche.

En 1874, le Français Achille LE BEL (1847/1930) et le Hollandais Jacobus Henricus VAN'T HOFF (1852/1911) proposèrent indépendamment des structures moléculaires chirales, ou énantiomères, basées sur un tétraèdre au centre duquel se trouve un atome de carbone, reliés à quatre radicaux différents. Une telle structure ne peut pas être superposée à son image miroir et existe en deux chiralités opposées (Fig. 7.2). On pensait d'abord que les molécules chirales étaient l'exclusivité de l'élément carbone. Progressivement, on ne fit plus appel qu'à la notion de symétrie miroir et la chiralité fut considérée une propriété de la molécule même et de sa structure spatiale. La notion de structure devint par la suite extrêmement importante, en particulier en biochimie où les fonctions des molécules complexes sont essentiellement structurales.

Chapitre 8

La structure de la matière

8.1 La structure de l'atome

8.1.1 Le tableau périodique

Dans la première moitié du XIXe siècle, la liste des éléments s'allonge et plusieurs chimistes (Dumas, Chancourtois, Newlands) y recherchent une certaine structure, pour y mettre un peu d'ordre. Le schéma le plus utile, celui qui s'impose finalement, est l'oeuvre du chimiste russe Dimitri MENDELÉËV (1834/1907). Celui-ci jonglait depuis longtemps avec l'idée : il avait réuni sur des cartes les diverses propriétés de chaque élément et il arrangeait ses cartes dans un ordre ou un autre dans l'espoir d'observer une régularité dans ces propriétés. Il s'aperçut que certaines propriétés revenaient de manière périodique quand les éléments étaient arrangés dans l'ordre des poids atomiques croissants. Son premier tableau date de 1869 ; il en publie une version améliorée en 1871, que nous reproduisons au tableau 8.1.

Mendéléïev ne respecte pas strictement l'ordre des poids atomiques et grand bien lui fait : on découvre plus tard que certains poids atomiques d'éléments plus rares étaient incorrects et les nouvelles valeurs confirment l'ordre de Mendéléïev. Celui-ci laisse plusieurs places en blanc et les associe à des éléments non encore découverts. En particulier, il prédit l'existence de trois éléments qu'il nomme *eka-bore*, *eka-aluminium* et *eka-silice* ("eka" est le préfixe sanskrit pour "premier"). Ces éléments sont découverts par la suite : l'eka-aluminium (1875) devient le *gallium*, l'eka-bore (1879) devient le *scandium* et l'eka-silice (1886) devient le *germanium*. Comme on le devine à ces noms, les trois éléments furent découverts respectivement par un Français, un Scandinave et un Allemand. Le tableau périodique reçoit une nouvelle colonne en 1895 quand William RAMSAY (1852/1916) découvre les gaz rares : l'hélium (1894), l'argon (1895), le néon, le krypton et le xénon (1898).

Le fait que les éléments puissent être arrangés de manière périodique ou quasi-périodique est une première indication, assez indirecte, que les atomes ont une structure et ne sont pas de simples objets indivisibles.

8.1.2 La spectroscopie

Si l'électrolyse joua un rôle de premier plan dans la découverte d'éléments nouveaux dans la première moitié du XIXe siècle, c'est la spectroscopie qui prit la relève dans la deuxième moitié. C'est en 1814 que Joseph FRAUNHOFER (1787/1826), un fabricant de lentilles bavares, découvrit des *raies* dans la lumière décomposée par un prisme. Il observa des raies jaunes dans le spectre de la lumière produite par une lampe à gaz et des raies sombres dans le spectre de la lumière solaire. Il observa aussi des raies dans le spectre des étoiles. Cette découverte avait été devancée par l'Anglais William WOLLASTON (1766/1828) en 1802, mais de manière moins précise.

TAB. 8.1 : Le tableau périodique de Mendéleïev (1871). Les éléments sont arrangés en 12 séries de huit groupes. Les poids atomiques de l'époque sont indiqués, ainsi que les incertitudes de Mendéleïev (?).

Période	gr. I	gr. II	gr. III	gr. IV	gr. V	gr. VI	gr. VII	gr. VIII
1	H=1							
2	Li=7	Be=9,4	B=11	C=12	N=14	O=16	F=19	
3	Na=23	Mg=24	Al=27,3	Si=28	P=31	S=32	Cl=35,5	
4	K=39	Ca=40	?=44	Ti=48	V=51	Cr=52	Mn= 55	Fe=56 Co=59 Ni=59 Cu=63
5	(Cu=63)	Zn=65	? =68	?=72	As=75	Se=78	Br=80	
6	Rb=85	Sr=87	?Yt=88	Zr=90	Nb=94	Mo=96	? = 100	Ru=104 Rh=104 Pd=106 Ag=108
7	(Ag=108)	Cd=112	In=113	Sn=118	Sb=122	Te=125	J=127	
8	Cs=133	Ba=137	?Di=138	?Ce=140				
9								
10			?Er=178	?La=180	Ta=182	W=184		Os=195 Ir=197 Pt=198 Au=199
11	(Au=199)	Hg=200	Ti=204	Pb=207	Bi=208			
12				Th=231		U=240		

C'est Gustav Robert KIRCHHOFF (1824/1887) qui avança une première explication de ce phénomène. Avec son collaborateur Robert Wilhelm BUNSEN (1811/1899), connu surtout pour son invention du brûleur à gaz, il invente le spectromètre, combinaison d'un prisme, d'instruments optiques et d'un mécanisme précis de rotation de ceux-ci (1859). Kirchhoff interprète les raies claires d'un spectre comme résultant de l'émission par une substance chauffée (comme le gaz du brûleur) d'une lumière ayant une ou des longueurs d'onde précises. Les raies sombres, au contraire, résultent de l'absorption par une substance intermédiaire et à des longueurs d'onde précises, de la lumière émise par une autre source. Par exemple, les raies sombres observées dans la lumière solaire résultent de l'absorption par les gaz de l'atmosphère (solaire et terrestre) de certaines longueurs d'onde tirées du spectre solaire. Lorsqu'un élément est chauffé par la flamme du brûleur, une lumière de couleur caractéristique apparaît et l'analyse spectrale révèle des raies particulières à cet élément. Kirchhoff découvre que chaque élément possède sa signature, son spectre propre. Ceci permet d'identifier des éléments encore inconnus, quand un spectre auparavant inconnu se présente.

En 1860, Kirchhoff découvre ainsi le césium, dont le nom est tiré du latin *cæsius*, désignant le bleu du ciel, d'après la couleur dominante de son spectre. En 1861 il découvre le rubidium, qui offre une raie rouge sombre, nommé par analogie avec la pierre de rubis. Bien d'autres éléments seront découverts de cette manière, qui ne nécessite aucune combinaison chimique, comme par exemple les gaz rares, dont l'hélium, ainsi nommé parce qu'il fut observé dans le spectre solaire (du grec *êlios* (ἥλιος) pour "soleil").

La spectroscopie trouve des applications immédiates en astronomie et en technologie. Par exemple, l'un des étudiants de Bunsen s'occupe dès le début des années 1860 à étudier la flamme s'échappant des haut-fourneaux dans les aciéries anglaises, qui ont adopté le procédé Bessemer pour la fabrication de l'acier. Or, ce procédé est très capricieux et difficile à contrôler. On découvre alors que la composition de l'acier peut être précisément caractérisée par l'étude spectrale de cette flamme et on peut ainsi contrôler le procédé.

8.1.3 L'électron

Les proportions définies observées dans les réactions électrolytiques suggèrent déjà que la charge électrique n'est pas continue, mais existe sous forme d'"atomes d'électricité". L'observation directe de ces "atomes" doit attendre la fabrication de tubes de verres évacués dans lesquels sont installés des électrodes. Ces *tubes à décharge* sont mis au point par Heinrich GEISSLER (1814/1879); le tube à décharge est ensuite amélioré par William CROOKES (1832/1919). On observe dans ces tubes d'étranges rayons, originaires de la cathode. Ceux-ci sont observés successivement par les savants allemands PLÜCKER, HITTORF et GOLDSTEIN. C'est ce dernier qui les appelle *rayons cathodiques* en 1876. Deux interprétations ont cours : soit ces rayons sont des particules, soit ce sont des ondes se propageant dans l'éther. Heinrich HERTZ et son étudiant Philipp LENARD croient en cette dernière hypothèse, mais Jean PERRIN (1870/1942) soutient la première et démontre en 1895 que les rayons cathodiques portent une charge électrique négative : ils sont déviés par un champ magnétique. En 1897, Joseph John THOMSON (1856/1940) confirme les résultats de Perrin, mesure même le rapport charge/masse de ces particules et réussit à les dévier à l'aide d'un champ électrique.¹ Plus tard, Thomson parvient à mesurer la charge de ces particules (expériences plus tard raffinée par l'Américain Robert MILLIKAN (1868/1953)) et en conclut que leur masse est environ 2 000 fois inférieure à celle de l'hydrogène. Ces particules sont plus tard appelées *électrons*, expression suggérée par le physicien irlandais STONEY. L'électronique est née : les téléviseurs et autres écrans cathodiques sont des versions améliorées des tubes de Crookes et du dispositif de Thomson pour dévier les électrons à l'aide d'un champ électrique !

J.J. Thomson fait l'hypothèse audacieuse que les atomes sont en fait constitués d'électrons, emprisonnés dans une sorte de "gelée" de charge positive. Ce modèle de l'atome est appelé modèle du *plum pudding*, car Thomson compare les électrons aux raisins du célèbre dessert anglais ! Il est suivi par d'autres, dont celui du Japonais NAGAOKA, qui propose un modèle "saturnien" de l'atome, dans lequel les électrons négatifs sont en orbite autour d'un centre positif, comme les anneaux de Saturne par rapport à leur planète.



FIG. 8.2: Ernest RUTHERFORD (1871/1937)

L'atome de Rutherford Entre 1908 et 1911, Ernest RUTHERFORD (1871/1937),² avec son collaborateur Hans GEIGER, procède à une série d'expériences dans lesquelles un faisceau de particules alpha (nous reviendrons plus loin sur ces particules) est lancé contre une mince feuille d'or. Si le modèle de Thomson était correct, les particules alpha, beaucoup plus lourdes que les électrons, devraient être faiblement déviées. Or, un certain nombre de particules sont déviées considérablement, certaines même vers leur point de départ. Rutherford disait que c'était aussi étonnant que si un obus lancé sur un mouchoir de poche rebondissait vers son point de départ ! La conclusion nécessaire de ces expériences est que la charge positive de l'atome

¹Ceci n'avait pu être fait auparavant parce que le vide à l'intérieur des tubes n'était pas assez grand : l'air résiduel s'ionisait et annulait le champ électrique appliqué.

²Rutherford, né en Nouvelle-Zélande, étudia sous la direction de J.J. Thomson. Il fut professeur de physique à l'Université McGill de 1898 à 1907, à Manchester de 1907 à 1919 et ensuite à Cambridge.

n'est pas répartie dans tout le volume de l'atome, mais est concentrée au centre, dans un *noyau*, et que les électrons évoluent autour de ce noyau massif et minuscule. Ce modèle de l'atome nucléaire est proposé par Rutherford en 1911.

8.1.4 La mécanique quantique

Du point de vue théorique, le modèle de Rutherford est intéressant mais pose des problèmes énormes. En particulier, il découle des lois de l'électromagnétisme que toute charge accélérée doit émettre des ondes électromagnétiques. Si l'électron tourne autour du noyau, il doit en émettre aussi et on peut calculer que l'atome devrait perdre de l'énergie par rayonnement à un taux si élevé que l'électron s'écraserait sur le noyau en une fraction de seconde. Plus généralement, il est impossible de comprendre le caractère stable des propriétés de chaque atome (et de chaque élément) avec un modèle planétaire classique de l'atome. En effet, même en oubliant le problème du rayonnement des ondes électromagnétiques, le mouvement classique d'un électron autour d'un noyau ne pourrait être circulaire ou elliptique que si ces deux particules (électron et noyau) étaient seules au monde. Dès que d'autres atomes sont présents, ou d'autres électrons, comme dans un atome plus lourd que celui d'hydrogène, le mouvement deviendrait en théorie inextricablement compliqué et chaotique. Les propriétés de l'atome (son spectre, les liaisons qu'il forme avec d'autres atomes, etc.) ne peuvent être permanentes dans un tel scénario ; en fait, l'atome devrait perdre toute son individualité.³

Le modèle de Bohr Il semble donc que la mécanique classique, celle de Newton et même celle d'Einstein, ne puisse être appliquée au mouvement des électrons dans les atomes. Ceci est compris par le Danois Niels BOHR (1885/1962), qui propose en 1913 une théorie de l'atome d'hydrogène dans laquelle l'électron suit des orbites circulaires autour du noyau ; seulement, seules sont permises les orbites dont le moment cinétique J est un multiple entier de $h/2\pi$, où h est la même constante invoquée par Einstein dans son hypothèse du photon et par Max Planck dans sa solution du problème dit du "corps noir". Bohr décrète que l'électron ne rayonne pas d'ondes électromagnétiques quand il est sur son orbite, mais uniquement quand il passe d'une orbite à l'autre, de manière discontinue. Chaque orbite circulaire correspond à une certaine énergie totale de l'électron, obtenue de son moment cinétique en appliquant les formules classiques de la force centripète et de la loi de Coulomb. L'atome peut donc être dans différents états d'énergies bien séparées et le passage d'un état à l'autre se fait par émission ou absorption d'un photon d'énergie $h\nu$. En fonction de la constante de Planck h , de la charge de l'électron e et de sa masse m , Bohr calcule très simplement que les fréquences permises pour ces photons sont

$$\nu = \frac{2\pi^2 m e^4}{h^3} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{n'^2} \right) \quad (8.3)$$

ce qui est exactement le spectre observé de l'atome d'hydrogène. Bohr peut expliquer non seulement la forme du spectre, mais aussi la valeur de la constante de Rydberg R et il peut la relier à la constante de Planck.

Voyons comment on peut parvenir à ce résultat de Bohr. Considérons l'électron en orbite circulaire autour du noyau. La force centripète qui le garde dans cette orbite est la force électrique e^2/r^2 , où r est le rayon de l'orbite et e la charge élémentaire (nous utilisons le système d'unités gaussien, couramment utilisé en physique théorique). Cette force centripète est aussi égale à mv^2/r , où v est la vitesse de l'électron le long de son orbite et m est sa masse. Donc $mv^2/r = e^2/r^2$, ce qui nous permet d'exprimer le r en fonction de v : $r = e^2/mv^2$. Le moment cinétique de l'électron est alors $J = mvr = e^2/v$. La quantification du moment

³Il faut souligner la différence suivante entre un atome à plusieurs électrons et le système solaire. Dans ce dernier, les différentes planètes n'exercent qu'une faible influence les unes sur les autres car la force gravitationnelle est proportionnelle au produit de masses et les masses des planètes sont petites en comparaison de celle du Soleil. On peut donc considérer, en première approximation, que les planètes tournent autour du soleil indépendamment les unes des autres. En réalité, l'influence mutuelle des planètes résulte en de petites perturbations de leurs orbites elliptiques. Dans l'atome, au contraire, les forces mutuelles (électriques) des électrons sont aussi importantes que la force qui attire chaque électron vers le noyau et le tout ne peut pas former, dans le schéma newtonien, une structure stable et permanente.

cinétique donne $J = n\hbar$ ou $v = e^2/n\hbar$. Enfin, l'énergie totale de l'atome (cinétique et potentielle) est

$$E = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{e^2}{r} = -\frac{1}{2}mv^2 = -\frac{me^4}{2n^2\hbar^2} = -\frac{2\pi^2me^4}{n^2h^2} \quad (8.4)$$

Ici n désigne le niveau d'énergie de l'atome. La différence entre les énergies de deux niveau n et n' correspond à un photon d'énergie $h\nu$, donc

$$h\nu = \frac{2\pi^2me^4}{h^2} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{n'^2} \right) \quad (8.5)$$

ce qui mène de suite à la formule ci-haut pour ν .

La théorie de Bohr est raffinée par Arnold SOMMERFELD en 1916, en permettant des orbites elliptiques quantifiées et en tenant compte des effets de la relativité restreinte. Ce dernier raffinement permet d'expliquer la structure fine du spectre de l'hydrogène. La théorie de Bohr et les raffinements subséquents qui lui sont apportés jusqu'en 1925 forment ce qu'on appelle l'*ancienne théorie quantique*. Cette théorie ne satisfait pas ses auteurs, car elle ne propose pas de règles générales pour l'étude du mouvement : elle n'est qu'un ensemble de conditions supplémentaires (conditions de quantification), d'apparence arbitraire, imposées au mouvement classique des électrons. D'ailleurs, la structure des atomes à plus d'un électron n'est pas du tout expliquée par cette théorie.

La mécanique ondulatoire En 1924 un aristocrate français, le prince Louis Victor DE BROGLIE ⁴(1892/1988), défend sa thèse de doctorat dans laquelle il propose que les particules de matière (en particulier les électrons) ont une double nature, ondulatoire et corpusculaire, tout comme les particules de lumière (photons). Ainsi, il doit être possible de faire interférer un faisceau d'électrons, de le diffracter, etc. De Broglie propose que la longueur d'onde d'une particule est déterminée par sa quantité de mouvement en vertu de la relation $p = h/\lambda$ (cette relation, appliquée au photon, correspond à l'hypothèse d'Einstein $E = h\nu$). Comme les particules matérielles ont une quantité de mouvement généralement grande par rapport à celle des photons, leur longueur d'onde doit être d'autant plus petite, ce qui explique qu'on ne l'ait jamais remarquée auparavant. Cette idée, révolutionnaire, est confirmée expérimentalement en 1927 quand les Américains C.J. DAVISSON et L.H. GERMER découvrent par accident le phénomène de la diffraction des électrons par un cristal. Le cristal joue ici le rôle du réseau de diffraction et le phénomène de diffraction est observé parce que la longueur d'onde des électrons est du même ordre de grandeur que la distance interatomique dans le cristal. De Broglie explique la condition de quantification utilisée par Bohr simplement en proposant que l'électron, autour du noyau, est une onde stationnaire refermée sur elle-même et la condition de Bohr ne fait qu'affirmer qu'une onde stationnaire doit comprendre un nombre entier de longueurs d'onde à l'intérieur de son espace d'oscillation. Autrement dit, la circonférence de l'orbite circulaire ($2\pi r$) est un nombre entier n de longueurs d'onde, ou $2\pi r = n\lambda = nh/p$, ce qui revient à la condition de Bohr $J = rp = nh/2\pi$.

De Broglie avait eu une intuition géniale, mais n'avait pas la finesse mathématique de l'Autrichien Erwin SCHRÖDINGER (1887/1961). Celui-ci suggère en 1926 une équation différentielle pour la fonction d'onde (l'amplitude de l'onde) de l'électron, applicable dans le cas des vitesses petites par rapport à celle de la lumière et peut retrouver exactement tous les niveaux d'énergie de l'atome d'hydrogène. Cette équation peut également être appliquée aux atomes plus complexes. Parallèlement à Schrödinger, d'autres physiciens travaillaient à une nouvelle mécanique, généralisation de la théorie de Bohr : Werner HEISENBERG (1901/1976), Wolfgang PAULI (1900/1958), Max BORN (1882/1970) et Paul DIRAC (1902/1984), pour ne citer que ceux-là. Ils mettent au point une théorie abstraite, originellement appelée *mécanique des matrices* et arrivent aux mêmes résultats que Schrödinger. Ce dernier démontre d'ailleurs que sa mécanique ondulatoire est tout à fait équivalente à la mécanique des matrices. Le mariage des deux donne ce qu'on appelle maintenant la *mécanique quantique*.

La mécanique quantique est un schéma général d'analyse du mouvement des objets microscopiques, comme la mécanique de Newton est une théorie générale du mouvement des objets macroscopiques. On peut montrer que la mécanique de Newton est un cas limite de la mécanique quantique. Celle-ci est d'ailleurs formulée à l'aide d'un appareil mathématique considérablement plus lourd que celui de la mécanique de Newton

⁴On prononce "de Broille". Sa famille est d'origine piémontaise et entra au service du roi de France en 1643. Le chef de famille porte le titre de "duc", les cadets de "prince" ou "princesse".

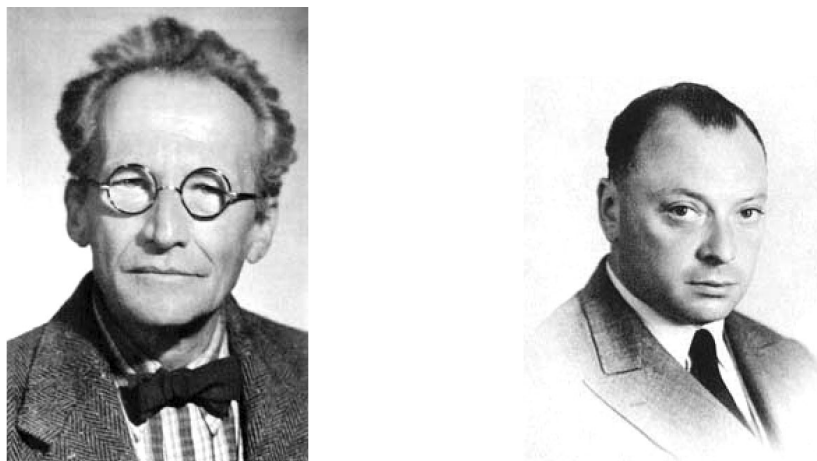


FIG. 8.3: Erwin SCHRÖDINGER (1887/1961) et Wolfgang PAULI (1900/1958)

et elle demande plus de temps à être maîtrisée par les étudiants. Cependant, elle a apporté à la science sa plus forte croissance en pouvoir de prédiction de tous les temps. Les progrès réalisés pendant la décennie qui a suivi l'élaboration de la mécanique quantique (1925-1926) sont stupéfiants. Citons-en quelques-uns :

1. La *structure des atomes* a pu être comprise par le modèle des couches et ses raffinements. Le tableau périodique a pu être expliqué. Un ingrédient fondamental de cette explication est le spin de l'électron (moment cinétique intrinsèque de l'électron, comme s'il tournait sur lui-même) et le principe d'exclusion de Pauli : deux électrons de même spin ne peuvent se trouver dans la même orbitale ou état quantique.⁵
2. La *liaison chimique* a été expliquée en fonction des forces électriques entre les électrons et les noyaux (SLATER, HEITLER, LONDON, PAULING). La structure spatiale des molécules peut ainsi être prédite ou expliquée.
3. La mécanique quantique a été appliquée au champ électromagnétique, ce qui a mené à une compréhension détaillée des processus d'émission et d'absorption de photons. Le *laser* est le produit le plus connu résultant de cette compréhension.
4. Les propriétés de base de la *phase solide* (conductivité, chaleur spécifique, etc.) ont été obtenues en combinant la mécanique quantique avec la mécanique statistique. Les conséquences technologiques de cette compréhension sont capitales : la physique des semiconducteurs a permis l'éclosion de la *microélectronique* et donc des télécommunications et des ordinateurs.
5. Dirac, en généralisant l'équation de Schrödinger au cas des grandes vitesses pour la rendre compatible avec la théorie de la relativité, fut amené à prédire l'existence d'une particule identique à l'électron, mais de charge opposée : son antiparticule, en quelque sorte. Cette particule, le *positron*, a été découverte expérimentalement en 1932 par Carl ANDERSON, trois ans après sa prédiction par Dirac.
6. Plus subtilement, la mécanique quantique, en permettant de dénombrer en principe les états possibles d'un système physique, a permis une définition plus précise de son entropie et a permis de formuler correctement la *troisième loi* de la thermodynamique, dont l'une des conséquences est qu'on ne peut atteindre le zéro absolu en un nombre fini d'étapes.

La mécanique quantique et le mouvement Non seulement l'avènement de la mécanique quantique nous a-t-il permis de prédire et de comprendre beaucoup mieux qu'auparavant les propriétés de la matière, mais il a complètement bouleversé notre conception du mouvement. La notion de trajectoire, centrale dans la mécanique de Newton et devenue partie intégrante de l'intuition des physiciens, n'a plus de sens en

⁵Ce principe est en fait plus subtil que ce qui est évoqué ici et fait fondamentalement référence à l'antisymétrie de la fonction d'onde lorsqu'on échange deux électrons. Il est fondamentalement lié au fait que tous les électrons sont indiscernables, c'est-à-dire qu'on ne peut les considérer comme des individus distincts.

mécanique quantique. Dans sa formulation la plus imagée (la mécanique ondulatoire), la description d'un système physique comme un atome repose sur notre connaissance de la *fonction d'onde* $\psi(x, y, z, t)$ de l'électron (dans un atome à plusieurs électrons, la fonction d'onde dépend des positions de tous les électrons). À chaque état possible de l'atome correspond une fonction d'onde différente. La notion d'*état* est ici centrale, comme dans le modèle primitif de Bohr. Quant à la position et la vitesse de l'électron, elles ne sont pas déterminées quand l'atome est dans l'un des ses états d'énergie bien définie. En fait, une quantité physique comme la position ou la vitesse n'est en général pas déterminée a priori, mais uniquement par un processus de mesure. Le processus de mesure force en quelque sorte le système physique à "choisir" une valeur de la quantité mesurée, ce qu'il fait selon une loi de probabilité déterminée par la fonction d'onde. Par exemple, l'interprétation physique de la fonction d'onde ψ est que son module carré $|\psi|^2$ représente la *probabilité* par unité de volume d'y trouver l'électron, d'où l'expression "nuage de probabilité" souvent utilisée pour décrire la place de l'électron dans l'atome.⁶ En somme, la mécanique quantique ne nous permet pas de faire des prédictions certaines sur les mesures effectuées, mais uniquement des prédictions *statistiques*.

Cependant, des quantités comme les niveaux d'énergie ou les différences de niveaux d'énergie peuvent être calculées et observées avec une précision souvent très grande. L'exemple le plus frappant est ce qu'on appelle le facteur gyromagnétique de l'électron, noté g , qui détermine l'espacement des niveaux d'énergie d'un électron isolé qu'on place dans un champ magnétique. Des expériences extrêmement précises, fondées sur le principe de la résonance, ont permis de mesurer ce nombre, avec le résultat suivant :

$$\frac{1}{2}g = 1,001\,159\,652\,180\,85\,(76) \quad (8.6)$$

(les nombres entre parenthèses représentent l'incertitude sur les derniers chiffres). Par contre, la mécanique quantique, dans sa version relativiste, prédit une valeur de $g/2$ exprimée en fonction de la constante de structure fine $\alpha = e^2/\hbar c$. En utilisant une valeur de α provenant des mesures spectroscopiques les plus précises, on trouve une valeur de $g/2$ en accord avec la valeur mesurée à 10 chiffres après la virgule. Une telle précision dans un accord entre théorie et expérience est inégalée dans toute la science. En fait, cette précision est si grande qu'on propose maintenant de définir la constante α à l'aide de cet accord, de sorte que

$$\alpha^{-1} = 137,035\,999\,710\,(96) \quad (8.7)$$

8.2 La radioactivité et le monde subnucléaire

8.2.1 Des rayons mystérieux

Nous devons maintenant effectuer un léger retour en arrière. Durant la période 1895-1900 le bestiaire de la physique s'enrichit de divers "rayons" qui frappent l'imagination populaire : rayons cathodiques, rayons X, alpha, beta, gamma. C'est l'époque de la découverte de la radioactivité, où l'on s'aperçoit que l'atome, dont l'existence est encore mise en doute par une partie de la communauté scientifique, n'est pas aussi insécable et permanent qu'on le croyait.

Les rayons X La période commence avec une découverte accidentelle. En novembre 1895, le physicien allemand Wilhelm Konrad RÖNTGEN (1845/1923) manipule un tube à décharge dans son laboratoire, dans une obscurité relative, et s'aperçoit soudain que l'écran phosphorescent qui traîne par hasard à côté devient lumineux ! Röntgen interpose divers objets entre le tube et l'écran ; certains forment une ombre, d'autres pas. Quand il interpose sa main, il en voit le squelette projeté sur l'écran ! Le tube à décharge doit projeter vers l'écran une espèce de rayons très pénétrants. Faute de mieux, Röntgen appelle ces rayons mystérieux "rayons X". La nouvelle de sa découverte se diffuse à la vitesse de l'éclair. Les applications médicales sont évidentes et c'est dans ce domaine que les rayons X suscitent le plus de publications en 1896. Röntgen ne sait que penser de ces rayons, sauf qu'ils se propagent dans l'éther... Il prend tout de même la peine

⁶En physique atomique et en chimie, les fonctions d'onde associées à divers états atomiques sont généralement appelées *orbitales*.

de constater qu'ils ne sont pas déviés par un champ magnétique et donc qu'ils ne portent pas de charge électrique, contrairement aux rayons cathodiques étudiés la même année par Perrin.

De plus en plus, on se doute que les rayons X sont en fait des ondes électromagnétiques de très petite longueur d'onde. Mesurer leur longueur d'onde requiert un réseau de diffraction très fin. C'est Max von LAUE (1879/1950) qui a l'idée, en 1912, d'utiliser un cristal comme réseau de diffraction. On se doute alors que les cristaux sont des arrangements périodiques d'atomes équidistants. Qui pourrait imaginer un réseau de diffraction avec des fentes plus étroites que la distance entre deux atomes ! Les cristaux agissent en fait comme un réseau de diffraction tridimensionnel et l'interprétation des mesures n'est pas une mince affaire. Un père et son fils y parviennent, à partir de 1913 : William Henry BRAGG (1862/1942) et William Lawrence BRAGG (1890/1971). Ils démontrent que les rayons X sont effectivement des ondes, avec une longueur d'onde qui varie d'une fraction d'angström à plusieurs centaines d'angströms. Du même coup, la nature discrète de la matière (l'existence des atomes) est confirmée pour la nième fois. Qui peut encore prétendre que les atomes n'existent pas ? Les rayons X deviennent par la suite un outil privilégié pour étudier la structure des cristaux, même ceux constitués de molécules aussi complexes que les protéines.

La découverte de la radioactivité En 1896, Henri BECQUEREL (1852/1908), un spécialiste de la fluorescence, s'intéresse beaucoup à la découverte de Röntgen. Il se demande si les rayons X ne sont pas produits par la fluorescence de l'extrémité du tube à décharge. Il décide donc de placer une certaine quantité de matière fluorescente sur un film photographique enveloppé au préalable dans du papier noir et d'exposer le tout au soleil, dans l'espoir que la lumière solaire induise une fluorescence (c'est-à-dire un dégagement de rayons X, selon lui) et que la plaque soit impressionnée. Le résultat est négatif, mais Becquerel ne se décourage pas et essaie d'autres substances fluorescentes, dont un sel d'uranium (l'élément le plus lourd connu à l'époque, au demeurant pas très utile). Surprise ! La plaque est impressionnée par ce que Becquerel croit être les rayons X émis par la fluorescence du sel. Le jour suivant il veut répéter son expérience mais le temps est couvert et il met le tout dans un tiroir de son bureau et, comme le temps maussade dure plusieurs jours, il décide de développer la plaque à tout hasard et trouve qu'elle est fortement impressionnée, beaucoup plus que celle qui est restée une journée au soleil ! Becquerel se rend compte que le sel d'uranium émet des rayons et que ça n'a rien à voir avec la fluorescence : tous les composés d'uranium en produisent, qu'importe leur formule chimique. Ce n'est donc pas un phénomène chimique à proprement parler. Becquerel découvre que ces rayons peuvent ioniser l'air et il dispose là d'un moyen de mesurer l'intensité des rayons, à la base des futurs compteurs Geiger. Enfin, il appelle ce phénomène "radioactivité".

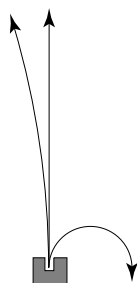
Les Curie L'année suivante, le physicien Pierre CURIE (1859/1906), déjà connu pour ses travaux sur les cristaux et le magnétisme, suggère à sa jeune femme, Marie SKLODOWSKA CURIE (1867/1934), qui vient d'accoucher de leur fille Irène, de faire sa thèse sur le phénomène de radioactivité découvert par Becquerel. Elle commence par vérifier les résultats de Becquerel. Comme le phénomène n'est probablement pas d'origine chimique, elle a l'idée d'étudier les minerais bruts d'uranium⁷ plutôt que sa forme purifiée, idée très fructueuse. Elle découvre dans ces minerais une radioactivité plus importante que celle de l'uranium pur. C'est donc qu'il y a une autre substance dans ces minerais, plus radioactive que l'uranium. Avec son mari, elle passe plusieurs mois à extraire cette substance. Les Curie finissent par isoler deux éléments nouveaux : le *polonium* (nommé en l'honneur de la patrie de Marie Sklodowska) et le *radium*, encore plus radioactif.

Chose curieuse, ces éléments ne sont pas stables : leur quantité diminue exponentiellement avec le temps. Au bout d'un temps T appelée *période* ou *demi-vie*, le nombre d'atomes de l'élément est divisé par deux ! Quant à la cause des rayons, elle n'est pas plus comprise, ni comment cette émission de rayons à partir de rien peut être compatible avec la conservation de l'énergie. Les Curie continuent inlassablement à extraire du radium et parviennent à en déterminer le poids atomique, non sans avoir enduré des travaux exténuants et nuisibles à leur santé. Pierre Curie mourra d'un accident de la circulation ; Marie Curie mourra d'une *anémie pernicieuse aplastique* présumément causée par l'exposition aux radiations, à un âge quand même respectable⁸. On utilisera assez tôt la radioactivité à des fins médicales ; c'est plus tard qu'on découvrira l'ampleur de sa nocivité à fortes doses.⁹

⁷Le minerai, la pechblende, est composé à 80% de l'oxyde U_3O_8 .

⁸Elle souffrait cependant de brûlures aux mains depuis plusieurs années, certainement causées par ses longs travaux.

⁹Les choses sont beaucoup moins claires à faibles doses. Pour un point de vue récent sur les dangers de la radioactivité à faible



(8.8)

Alpha, beta, gamma Ernest Rutherford, que nous avons rencontré plus haut en rapport avec son modèle nucléaire de l'atome, s'intéresse aussi à la radioactivité, plus particulièrement aux propriétés des rayons émis. En 1898, il distingue deux types de rayons émis par les substances radioactives, qu'il appelle *alpha* et *beta* respectivement. En 1900, le Français Villard en découvre une troisième sorte, qu'il appelle *gamma*, pour continuer la série. Les rayons alpha sont faiblement déviés par un champ magnétique, les rayons beta fortement déviés dans le sens opposé et les rayons gamma pas déviés du tout : les rayons alpha sont donc des particules relativement massives de charge positive, les rayons beta sont beaucoup plus légers et de charge négative, alors que les rayons gamma sont neutres. De plus, les rayons alpha sont très peu pénétrants dans la matière, les rayons beta assez pénétrants et les rayons gamma beaucoup plus. Il se trouve que les rayons alpha ne sont que des noyaux d'hélium, comme Rutherford le découvre en 1908. Quant aux rayons beta, ce ne sont que des électrons (rayons cathodiques). Les rayons gamma, enfin, sont une onde électromagnétique, comme les rayons X, mais leur longueur d'onde est encore plus petite...

Les rayons cosmiques Dans les années 1910, on découvre avec surprise qu'une certaine dose de radioactivité nous parvient de l'espace. En 1910, le Suisse GÖCKEL mesure la radioactivité naturelle à bord d'un ballon, pensant ainsi observer une diminution à mesure qu'il s'éloigne de la source présumée de cette radioactivité (la croûte terrestre). Au contraire, la radioactivité augmente avec l'altitude ! Les rayons détectés proviennent de l'espace et non de la Terre : on les appelle *rayons cosmiques*. Leur étude devient une branche nouvelle et romantique de la physique nucléaire : elle s'accompagne d'ascensions en ballon à des altitudes de plus en plus grandes. L'Autrichien HESS s'élève à 5 000m en 1911, puis à 9 000m en 1913. Dans les années 1920, Millikan envoie des ballons-sondes à 15km d'altitude. Le Suisse Auguste PICCARD (1884/1962) construit un ballon à nacelle pressurisée lui permettant de s'élever jusqu'à la stratosphère (>16 km) et de mesurer le rayonnement cosmique.¹⁰ On découvre que le flux de rayons cosmiques augmente, puis diminue avec l'altitude, avec un maximum en haute atmosphère. En fait, les rayons cosmiques sont des particules stables (protons, photons, électrons) de très haute énergie provenant peut-être de l'univers en formation. Leur incidence sur les molécules de la haute atmosphère terrestre crée quantité d'autres particules, comme les mésons, qui se désintègrent avant de parvenir au sol. Certains rayons cosmiques ont des énergies colossales, qu'aucun accélérateur terrestre ne peut produire.

8.2.2 Le noyau atomique

Peu à peu on découvre que les substances radioactives qui disparaissent sont remplacées par d'autres éléments, souvent radioactifs eux-aussi, mais avec des périodes différentes. Plusieurs substances radioactives sont identifiées dans la première décennie du siècle. Certaines sont mêmes impossibles à distinguer chimiquement d'éléments connus comme le plomb. Le tableau qui s'en dégage est le suivant : l'atome de la substance radioactive initiale (ex. l'uranium) se désintègre en émettant une particule alpha, beta ou gamma (selon le cas) et se transforme en un atome d'un autre élément, lui aussi radioactif, qui se désintègre à son tour, jusqu'à ce qu'un élément stable soit obtenu. Le tout constitue une *séquence radioactive*. On s'aperçoit aussi qu'un élément donné existe souvent en plusieurs variétés, appelées *isotopes*, qui diffèrent par leur

dose, voir la référence [38].

¹⁰Piccard inventa aussi le bathyscaphe (1948), permettant d'atteindre les profondeurs sous-marines sans précédent. On croit qu'il fut l'inspiration d'Hergé pour le personnage du professeur Tournesol.

masse atomique. L'élément naturel est généralement un mélange de différents isotopes.¹¹ Cette vision des choses est largement due à Rutherford et à son collaborateur Frederic SODDY, mais de nombreux chercheurs enrichissent l'étude de la radioactivité à cette époque.

Les réactions nucléaires Après la première guerre mondiale, période pendant laquelle l'activité scientifique baissa énormément, les recherches sur la radioactivité reprirent de plus belle. Rutherford s'occupa à bombarder diverses substances avec des particules alpha et s'aperçut en 1919 que le choc des particules alpha avec l'azote de l'air produisait de l'hydrogène (^1_1H). La meilleure explication de ce phénomène est que ce choc produisait une véritable réaction nucléaire :



Pour la première fois, le rêve des alchimistes, la transmutation des éléments, était réalisé ! Incidemment, le noyau d'hydrogène ainsi produit reçut le nom de *proton*. La conclusion, pour Rutherford, est que les noyaux sont constitués de protons et d'électrons et que ces constituants peuvent passer d'un noyau à un autre lors d'une réaction.

Le neutron et la structure du noyau En 1930, des expériences de ce type firent apparaître une nouvelle sorte de rayons (encore une !) très pénétrants et impossibles à détecter directement. En 1932, James CHADWICK (1891/1974) émit l'hypothèse que ce rayonnement était constitué de particules neutres, de la masse du proton, et appela cette particule *neutron*. Dès lors, la structure du noyau atomique se clarifia : un noyau de numéro atomique Z et nombre de masse A contient Z protons et $A - Z$ neutrons. Les protons devraient normalement se repousser en raison de leurs charges électriques semblables, mais on supposa qu'une force beaucoup plus intense (la force nucléaire) les maintenait ensemble, avec les neutrons. L'intensité de cette force devait être telle que l'énergie associée est très grande, suffisamment grande pour que la relation d'Einstein $E = mc^2$ lui associe une masse non négligeable. C'est ainsi qu'on comprit pourquoi la masse M d'un noyau n'est pas simplement $Zm_p + (A - Z)m_n$, où m_p et m_n sont les masses du proton et du neutron, respectivement, mais inférieure à cette valeur. On peut ainsi définir le rapport

$$\Delta = \frac{Zm_p + (A - Z)m_n - M}{A}, \quad (8.10)$$

Ce rapport, multiplié par c^2 , est la quantité d'énergie qu'il faudrait fournir par nucléon (un nucléon est un proton ou un neutron) pour dissocier complètement le noyau en ses constituants. Plus Δ est grand, plus le noyau est stable. Δ est en fait l'énergie de liaison du noyau, par nucléon. Une séquence radioactive procède par augmentation progressive de Δ , jusqu'à ce qu'un noyau stable soit atteint. Mais si on ne se limite pas aux processus de désintégration – sur lesquels nous n'avons aucun contrôle – et qu'on considère des processus de réaction analogues aux réactions chimiques, il devient concevable d'augmenter l'énergie de liaison des produits par rapport au réactants et de recueillir la différence, comme dans une réaction chimique de combustion, mais cette fois à une échelle d'énergie un million de fois plus grande. Cette idée, de recueillir l'énergie nucléaire, est assez ancienne, car l'écrivain H.G. WELLS la conçut dans son roman *The World Set Free*, publié dans les années 1910. C'est cependant dans les années 1930 qu'elle se matérialisa.

La fission nucléaire Dans les années 1930, de nombreux groupes de recherches, dont les plus éminents étaient ceux de Otto HAHN à Berlin et du couple Frédéric JOLIOT – Irène CURIE à Paris, étudièrent les réactions nucléaires. On pensait généralement que ces réactions, au cours desquelles des noyaux sont bombardés par des neutrons, des particules alpha, etc., ne provoquaient que des petits changements de numéro atomique et de nombre de masse. C'est Otto Hahn et Fritz STRASSMAN qui s'aperçurent que ces réactions pouvaient entraîner la *fission* d'un noyau en deux noyaux de tailles bien inférieures. En fait, l'interprétation correcte de leurs expériences est due à Lise MEITNER et à son neveu Otto FRISCH.¹² La possibilité de fission fut rapidement confirmée dans plusieurs laboratoires en 1939. Plus important, Joliot et ses collaborateurs von HALBAN et KOWARSKI découvrirent que la fission produit aussi des neutrons, qui peuvent de fait causer d'autres fissions, etc. Une *réaction en chaîne* est dès lors possible. Cette possibilité avait été anticipée

¹¹Pour distinguer les différents isotopes, on les représente par le symbole de l'élément, avec le numéro atomique (la charge du noyau) en bas à gauche et la nombre de masse en haut à gauche, comme ceci : ^4_2He , $^{238}_{92}\text{U}$, $^{235}_{92}\text{U}$, etc.

¹²Meitner et Frisch étant d'origine juive, leur mérite fut loin d'être reconnu en Allemagne, à cette époque en plein hitlérisme.

par les théoriciens Enrico FERMI et Leo SZILARD. La voie vers la fission contrôlée, l'énergie nucléaire et les armes nucléaires était ouverte. La deuxième guerre mondiale, contrairement à la première, fut la cause de progrès rapides en ce domaine. La première pile nucléaire fut construite à Chicago par Fermi et ses collaborateurs en 1942 et la première explosion d'une bombe nucléaire eut lieu en 1945.¹³

Signalons qu'on comprit aussi dans les années 1930 que la production d'énergie dans les étoiles est d'origine nucléaire, cette fois par un processus de fusion de noyaux légers en noyaux plus lourds. On se doutait auparavant du rôle de l'énergie nucléaire dans les étoiles, mais on croyait que la radioactivité seule était en cause. C'est le physicien germano-américain Hans BETHE (1906/–) qui proposa, en 1939, le cycle de réactions nucléaires (dit cycle du carbone) par lequel s'effectue la production d'énergie dans les étoiles chaudes.¹⁴ Cette découverte permit aussi d'élaborer une théorie très satisfaisante sur la formation des éléments dans les étoiles et dans l'Univers ancien (nucléogénèse).

8.2.3 Le monde subnucléaire

À partir des années 1930, les physiciens construisirent des appareils capables d'accélérer des particules à des énergies de plus en plus grandes et ne dépendirent plus de la radioactivité naturelle pour produire des projectiles propres à explorer la structure des noyaux. La technologie des accélérateurs de particules (cyclotron, synchro-cyclotron et ensuite synchrotron) s'accompagna d'une technologie également complexe de détection de particules. L'énergie des particules accélérées dans les années 1930 atteignait quelques MeV, c'est-à-dire de l'ordre de l'énergie de masse mc^2 de l'électron (0,511 MeV). Dans les années 1990, cette énergie était de l'ordre de 10^6 MeV. Les laboratoires de physique des particules sont immenses, très coûteux et les publications scientifiques sont précédées d'une liste d'auteurs qui fait souvent plus d'une page tellement les équipes de recherche comptent de collaborateurs.

Bien vite, une foule de nouvelles particules firent leur apparition : le méson en 1938, le pion en 1947 et des centaines d'autres dans les années 1950 et 1960. On se trouva vite dans le même dilemme que les chimistes avant la classification périodique des éléments. Le physicien américain Murray GELL-MANN émit alors l'hypothèse que la plupart de ces particules, comme les atomes, étaient composées de particules plus élémentaires qu'il appela *quarks*¹⁵. Ainsi, le proton et le neutron sont composés chacun de trois quarks. Gell-Mann réussit, comme Mendéléïev avant lui, à prédire l'existence d'une nouvelle particule, avec ses propriétés, à partir d'une place vacante dans son tableau (le Ω^- , découvert en 1964). Aujourd'hui, les physiciens disposent d'une théorie satisfaisante des particules élémentaires, appelée "modèle standard" (nom à vrai dire un peu décevant).

Les particules sont classées de la manière suivante : on distingue les *fermions* des *bosons*. Les premiers sont les véritables constituants de la matière, comme l'électron et les quarks. Les deuxièmes sont les particules associées aux forces fondamentales, comme le photon, qui est associé à la force électromagnétique. Les autres forces fondamentales, l'interaction forte et l'interaction faible, agissent principalement à l'intérieur des noyaux ou à des échelles encore plus petites. Parmi les fermions on distingue les *leptons* des *quarks*. Les premiers ne subissent pas l'interaction forte, alors que les deuxièmes sont dominés par cette interaction, qui les confine toujours en groupes de deux ou de trois. Par exemple, le proton est composé de trois quarks (*uud*), comme le neutron (*udd*). Les fermions sont aussi arrangés en trois "familles" : chaque famille comporte deux leptons (un lepton massif, comme l'électron, et un neutrino, sans masse et sans charge) et deux quarks. Les particules massives des familles supérieures sont instables et se désintègrent en particules de la première famille et en neutrinos. Les neutrinos (symbolisés par la lettre ν) sont sans doute les particules les plus nombreuses de l'Univers, mais elles interagissent si faiblement avec le reste de la matière qu'elles

¹³Remarquons que la somme de calculs à effectuer pour le développement de la bombe atomique était si grande qu'on commença à développer des machines capables de faire les calculs numériques à la place de l'humain. Une compagnie appelée *International Business Machines*, mieux connue par ses initiales, fut mise à contribution et eut par la suite un certain succès dans le développement et la vente de ces appareils...

¹⁴On dit que Bethe, peu après sa découverte, contemplant un soir les étoiles en compagnie de sa femme, lui dit : "et dire que je suis la seule personne au monde qui sait pourquoi elles brillent..."

¹⁵Cette hypothèse des quarks fut proposée indépendamment par George ZWEIG, jeune chercheur postdoctoral, qui n'en reçut aucune reconnaissance à l'époque.

n'ont pas été détectées avant les années 1950.

TAB. 8.2: Tableau des fermions élémentaires.

Leptons	0 -1	ν_e électron (e)	ν_μ muon (μ)	ν_τ tau (τ)
Quarks	$\frac{2}{3}$ $-\frac{1}{3}$	up (u) down (d)	charm (c) strange (s)	top (t) bottom (b)

TAB. 8.3: Tableau des interactions élémentaires et des bosons associés.

Interaction	Bosons associés
Électromagnétique	photon (γ)
Faible	W^+, W^-, Z_0
Forte	8 gluons (g)

Évidemment, il est impossible de résumer notre connaissance du monde subnucléaire en un tableau aussi succinct que simplifié. Mais nous arrêterons ici notre relation de la quête du microscopique pour nous tourner vers le macroscopique et le complexe.

Chapitre 9

L'expansion de l'Univers

Jusqu'au XVII^e siècle, les humains concevaient leur univers comme restreint dans l'espace et dans le temps. La religion chrétienne enseignait que le Monde a été créé en six jours et cette croyance était acceptée au sens littéral et non comme une allégorie. Des exégètes de la Bible avaient calculé, en se basant sur les chronologies et longévités énumérées dans la Genèse, que le Monde avait été créé seulement quelques milliers d'années auparavant. Par ailleurs, l'Univers était contenu dans la sphère des étoiles fixes et ses dimensions étaient modestes, en comparaison de la distance Terre-Soleil réelle.

Aujourd'hui, l'âge de l'Univers est évalué à environ 13.7 milliards d'années et sa taille à la distance franchie par la lumière dans un temps comparable à son âge. De plus, on sait que l'Univers compte des milliards de galaxies, chacune pouvant contenir des milliards d'étoiles. Ceci laisse beaucoup de place à des mondes analogues à notre planète. Cette durée et l'inimaginable richesse de l'Univers auraient semblé incroyables, voire sacrilège, il y a trois siècles. Le but de ce chapitre est d'expliquer comment les limites de l'Univers ont explosé, à la fois dans l'espace et dans le temps. Le titre de ce chapitre fait référence non seulement à l'expansion physique de l'Univers, reconnue depuis les années 1920, mais à son élargissement progressif dans l'esprit des astronomes depuis deux siècles.

9.1 L'immensité de l'Univers

9.1.1 Les instruments astronomiques

L'astronomie, plus peut-être que n'importe quelle autre science, progresse grâce à ses *instruments* et chaque étape nouvelle dans le perfectionnement des instruments d'observation a apporté une vague importante de découvertes ou de remises en question de notre vision de l'Univers.

Le perfectionnement du télescope fut lent. Tout d'abord, il faut distinguer les *lunettes astronomiques*, basées sur la réfraction des rayons lumineux par des lentilles, des *télescopes à réflexion* (ou tout simplement, *télescopes*), dont la composante centrale est un miroir concave qui concentre les rayons lumineux par réflexion. Bien sûr, les deux types d'instruments utilisent des lentilles dans l'oculaire pour agrandir l'image formée par concentration des rayons. C'est une lunette primitive qu'utilisa Galilée et qu'améliora Huygens. Le principal problème associé à la lunette est l'*aberration chromatique*, découverte par Newton : comme la longueur focale d'une lentille dépend non seulement de la forme et des dimensions de la lentille, mais aussi de l'indice de réfraction du verre et que celui-ci dépend de la longueur d'onde, la longueur focale d'une lentille varie légèrement selon les couleurs et il est impossible de former une image parfaitement claire d'un objet coloré à l'aide d'une seule lentille. Newton en conclut qu'il ne valait pas la peine de perfectionner la lunette¹ et se tourna à la place vers le télescope à miroir, dont Galilée avait déjà eu l'idée sans le construire.

¹Par la suite, on trouva un moyen d'atténuer quelque peu les effets de l'aberration chromatique par une combinaison de lentilles

Les télescopes ont longtemps été plus chers et plus difficiles d'entretien que les lunettes, car les miroirs étaient de bronze blanc ou de cuivre et non de verre à surface métallisée.² Malgré cela, les télescopes ont peu à peu pris le pas sur les lunettes, surtout depuis la construction de télescopes géants (plus d'un mètre d'ouverture) par W. Herschel et Lord Ross.

Au XIX^e siècle, deux innovations vont particulièrement changer les pratiques astronomiques. Premièrement, le couplage du télescope à un appareil *photographique* (la photographie s'est progressivement développée à partir des années 1830). Cette technique a permis d'inventorier des objets trop pâles pour être visibles à l'oeil nu, en augmentant le temps d'exposition. Deuxièmement, l'utilisation de la *spectroscopie*, permettant de déterminer la composition chimique de l'objet et sa température. Ainsi l'Anglais Joseph Norman LOCKYER (1836/1920) et le Français Jules JANSSEN (1824/1907) découvrirent indépendamment, dans un spectre de l'atmosphère solaire, la présence de l'hélium, élément alors inconnu sur Terre.

Enfin, le développement principal dans l'observation astronomique au XX^e siècle fut l'invention (ou la découverte) de la *radio-astronomie*. En 1932, Carl JANSKY (1905/1950), un ingénieur américain travaillant pour les laboratoires Bell et ayant pour mission d'étudier le bruit de fond causé par les orages sur la transmission radio, découvre des sources insolites de bruit radio. Ces sources sont manifestement situées hors du système solaire, car elles se manifestent à un intervalle de 23h 56m, soit le jour sidéral. En 1935, Jansky annonce que

Les émissions sont captées chaque fois que l'antenne est orientée vers une portion du système de la Voie lactée, la réponse la plus grande étant enregistrée quand l'antenne est dirigée vers le centre du système. Ceci amène à conclure que la source de ces émissions est située parmi les étoiles elles-mêmes ou dans la matière interstellaire éparse dans la Voie lactée.

Plus tard, on construit des antennes paraboliques dédiées à la réception des ondes radio émises par les objets célestes et on dresse une carte radio de la sphère céleste, carte qui confirme la position du centre de la Voie lactée.

Plus tard dans le siècle, on mettra au point des instruments capables de détecter d'autres plages du spectre électromagnétique (rayons X, UV, infra-rouges et micro-ondes). De nos jours, les images sont produites à l'aide de caméras CCD (*charge coupling device*) qui peuvent détecter jusqu'à 8 photons sur 10, et sont ainsi beaucoup plus sensibles que l'oeil ou qu'une plaque photographique. Ces caméras équipent entre autres le télescope spatial Hubble (ainsi que toutes les sondes spatiales), mais aussi les caméras vidéo vendues au grand public.

9.1.2 Le système solaire

Jusqu'au XVII^e siècle, on ne connaissait que sept astres différents, hormis les étoiles : le Soleil, la Lune et cinq planètes (Mercure, Vénus, Mars, Jupiter, Saturne). Nous avons vu comment l'utilisation de la lunette par Galilée lui a permis d'observer les satellites de Jupiter et de constater que les astres ne sont pas parfaits : montagnes sur la Lune, taches sur le Soleil, etc. Plus tard, Huygens, après avoir perfectionné le télescope, découvre que Saturne est entouré d'un anneau et possède aussi un satellite (Titan).

William Herschel L'astronomie est une science d'observation à la portée de tous, comme en témoigne le très grand nombre d'astronomes amateurs encore de nos jours. Beaucoup de découvertes importantes ont été réalisées par des amateurs. Le plus connu de ces amateurs dans l'histoire de l'astronomie est l'Allemand (naturalisé Anglais) William HERSCHEL (1738/1822), qui devint rapidement un professionnel reconnu. Herschel était d'abord musicien, mais s'intéressa progressivement à la philosophie naturelle. En 1773, il loua un télescope et construisit son propre télescope la même année. En 1778, il disposait d'un télescope de 15 cm d'ouverture, meilleur que tous les télescopes ou lunettes existants. Il construisit par la suite des télescopes de plus en plus grands, dont un colosse de 122 cm d'ouverture et de 12 m de long.

et on continua de fabriquer des lunettes. La plus grosse jamais fabriquée est celle de l'observatoire Yerkes (États-Unis), inaugurée en 1897 : son objectif a 102 cm de diamètre.

²C'est le physicien français Léon FOUCAULT qui perfectionna la préparation des miroirs à surface métallisée.

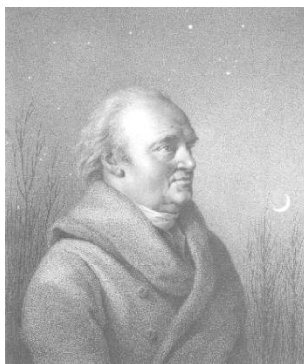


FIG. 9.1: William HERSHEY (1738/1822)

En 1781, Herschel découvre dans la constellation des Gémeaux une étoile pas comme les autres : elle a un diamètre apparent. Herschel pense d'abord que c'est une nouvelle comète, mais son orbite n'est pas typique d'une comète. On arrive bientôt à la conclusion que c'est une nouvelle planète, inconnue auparavant. En l'honneur de son roi (Georges III d'Angleterre), Herschel propose d'appeler la planète *Georgium Sidus* (l'étoile de Georges), mais les astronomes, à la suggestion de l'Allemand Bode, l'appelleront plutôt *Uranus*, pour continuer dans la lignée des dieux grecs.³ Herschel, comme récompense de sa flatterie, recevra une pension du roi Georges III.

Herschel se consacre ensuite à construire un catalogue précis d'étoiles, en particulier des étoiles doubles. Il refuse cependant longtemps de reconnaître que ces étoiles doubles ne sont pas le fruit d'un alignement visuel fortuit, mais réellement constituées de deux étoiles en orbite l'une autour de l'autre, comme le prétend l'astronome John MICHELL. En 1802, il note, par rapport à ses observations précédentes, le mouvement de rotation mutuelle des étoiles doubles, première évidence de l'action de la gravitation en dehors du système solaire ! Les lois de la physique s'appliquent donc aussi aux étoiles et la gravitation mérite donc son titre d'*universelle*.

En 1783, à l'aide d'un télescope de 47,5 cm d'ouverture, Herschel commence à recenser des objets plus pâles et flous, appelés *nébuleuses*. En 1781 le Français Charles MESSIER avait déjà publié un catalogue de 103 nébuleuses, qu'on connaît encore aujourd'hui par le numéro qu'il leur a donné (par exemple, la nébuleuse d'Andromède M31, l'amas d'Hercules M13, etc.). Nous y reviendrons plus loin.

Enfin, Herschel fut le premier à mettre en évidence le *mouvement propre* du Soleil. On s'aperçut progressivement au XVIII^e siècle que les étoiles ne sont pas absolument fixes, mais que leur position dans la sphère céleste peut varier, quoique très lentement.⁴ Herschel, en étudiant le catalogue des positions de 36 étoiles, arriva à la conclusion que la plus grande partie de leur mouvement propre pouvait être expliquée par le mouvement du système solaire en direction d'un point qu'il appela *apex*, situé dans la constellation d'Hercules : les mouvements propres des étoiles étudiées semblaient diverger de ce point et converger vers le point opposé dans l'espace.⁵ Bien sûr, même en tenant compte du mouvement propre du Soleil vers l'apex, les autres étoiles conservent aussi un mouvement propre résiduel.

La découverte de Neptune Herschel a découvert Uranus, mais n'a pas été le premier astronome à l'observer : d'autres l'ont vue avant lui, sans reconnaître qu'il s'agissait d'une planète. On put s'en apercevoir a posteriori, en comparant les observations de ces astronomes aux catalogues d'étoiles de plus en plus complets disponibles au début du XIX^e siècle. Vers 1820, non seulement observait-on Uranus depuis 40 ans, mais on disposait d'une vingtaine d'observations antérieures à sa "découverte", allant aussi loin que 1690.

³Dans la mythologie gréco-romaine, Uranus (Ouranos) est le père de Saturne (Chronos), lui-même père de Jupiter (Zeus).

⁴Nous avons mentionné comment Halley utilisa le catalogue d'Hipparque pour démontrer le mouvement propre de Sirius, Arcturus et Aldébaran.

⁵On sait aujourd'hui que l'apex est situé plutôt près de l'étoile Vega, dans la constellation de la Lyre, voisine de la constellation d'Hercules.

Disposer d'observations précises et étalées sur suffisamment longtemps permit de calculer les éléments de l'orbite d'Uranus. Or, on s'aperçut que les prédictions de la mécanique classique découlant de la théorie de la gravitation universelle étaient en désaccord avec les observations récentes, pour ce qui est de la position de la planète. Le désaccord était minime (1,5 minutes d'arc), mais souvenons-nous que Kepler remit en cause le modèle de Copernic pour un désaccord de 2 minutes d'arc à peine ! À partir de 1835, les plus grands astronomes du temps (Airy, Bessel, John Herschel,⁶ Arago, Bouvard) commencèrent à envisager l'existence d'une autre planète, plus éloignée qu'Uranus, et dont l'attraction gravitationnelle sur cette dernière serait responsable du désaccord.

Un problème mathématique colossal se posait alors : connaissant le désaccord entre l'orbite calculée et l'orbite observée d'Uranus, est-il possible d'en déduire l'orbite de la planète perturbatrice ? À cette époque, les techniques mathématiques s'étaient beaucoup améliorées depuis le temps des *Principia* de Newton. En particulier, la *mécanique céleste*, cette partie de la mécanique qui s'intéresse au mouvement des corps célestes, avait beaucoup progressé, en bonne partie grâce aux travaux de Pierre Simon de LAPLACE (1749/1827). Il fallait tout de même un astronome et mathématicien courageux pour entreprendre ce calcul. À l'été 1845, Arago persuada Urbain LE VERRIER (1811-1877) de s'y plonger. Le 18 septembre 1846, le calcul définitif étant enfin terminé, Le Verrier écrit à l'astronome Berlinoise Johann GALLE (1812/1910) pour lui demander d'observer le ciel à la position indiquée. Dès réception de la lettre, le 23 septembre, Galle pointe son télescope dans la direction précise indiquée par Le Verrier mais ne trouve rien. Son assistant Henri D'ARREST suggère alors de comparer cette région du ciel à une carte céleste très complète, parue en 1845. Or, à 52 minutes d'arc de la position indiquée par Le Verrier, ils trouvent une étoile nouvelle. La nuit suivante, elle s'était déplacée suffisamment pour qu'on puisse conclure qu'il s'agissait d'une planète nouvelle ! Cette découverte spectaculaire, basée sur un calcul et non le fruit du hasard, eut un énorme retentissement dans le monde scientifique et dans le grand public. Elle signalait le triomphe de la mécanique de Newton et des méthodes de la mécanique céleste développées notamment par Lagrange et Laplace.

Cette découverte déclencha aussi une controverse franco-anglaise. Deux ans auparavant, un jeune astronome anglais de 22 ans, John Couch ADAMS (1819/1892), entreprit le même calcul que Le Verrier, avec à peu près les mêmes hypothèses et arriva semble-t-il au même résultat. Il eut cependant moins de chance avec les astronomes de son pays, car le directeur de l'observatoire de Greenwich, George AIRY (1801/1892), ne le prit pas au sérieux, du moins pas avant d'avoir entendu parler des calculs en cours par Le Verrier, en juillet 1846. Il demanda alors à l'observatoire de Cambridge de chercher la planète selon les calculs d'Adams, mais les astronomes de Cambridge ne disposaient pas de la carte céleste précise que Galle et d'Arrest avaient utilisée et furent obligés de procéder à plusieurs observations comparatives, ce qui est beaucoup plus long. Par manque de temps et de diligence, ils ne purent identifier la planète avant l'annonce de sa découverte par Galle. Ils s'aperçurent ensuite qu'ils l'avaient observée trois fois depuis juillet ! Après coup, Airy tenta de sauver les meubles en publiant une liste partielle des travaux de Adams, démontrant que son mérite égalait celui de Le Verrier. Les calculs complets de Adams ont été retrouvés en 1998 et montrent un niveau de sophistication inférieur à ceux de Le Verrier. Ses prédictions sur la position de Neptune étaient changeantes, pouvant varier autant que de 20 degrés les unes par rapport aux autres.⁷ Tout ceci démontre bien à quel point l'histoire des sciences, comme l'histoire tout court, est sujette à des récupérations politiques ou nationalistes, surtout depuis que les prouesses scientifiques sont un élément important de la fierté des peuples.

En réalité, Le Verrier et Adams furent très chanceux dans leurs calculs, car l'orbite réelle de Neptune (c'est ainsi qu'on appela la nouvelle planète) est assez différente de celle calculée par les deux astronomes. Ils supposèrent tous les deux que le rayon de son orbite était de 38 unités astronomiques⁸ et Le Verrier supposa que sa masse était 32 fois celle de la Terre. Or, le rayon de l'orbite de Neptune n'est que de 30 unités astronomiques et sa masse n'est que de 17 fois celle de la Terre. Cette masse put être mesurée dès la fin 1846 car on découvrit rapidement un satellite à Neptune (Triton) : l'observation de la période du satellite et du rayon de son orbite autour de Neptune permet directement de déduire la masse de la planète. En fait, les deux erreurs de Le Verrier se compensent assez bien : la planète étant moins massive, elle doit perturber

⁶Le fils de William Herschel.

⁷W. Sheenan, *Sky and Telescope*, July 2003.

⁸Une unité astronomique est égale à la distance moyenne entre la Terre et le Soleil.

moins l'orbite d'Uranus, mais elle est également moins éloignée et l'effet net n'est pas trop différent. Il explique quand même les 52 minutes de différence entre la prévision et l'observation. Le véritable coup de chance est que la conjonction d'Uranus et de Neptune, le moment où l'influence de Neptune sur Uranus est la plus grande, ait eu lieu en 1822, alors qu'il s'en produit une à tous les 170 ans, environ.

Si nous avons choisi de décrire un peu plus en détail les circonstances entourant la découverte de Neptune, c'est qu'elles constituent un cas exemplaire de découverte scientifique, où la chance, les erreurs et la réputation ont leur petit rôle, de même que la rivalité entre des équipes concurrentes.

9.1.3 Les échelles de distance en astronomie

La parallaxe On peut justement affirmer que le problème fondamental de l'astronomie est la mesure des distances. Comment évaluer la distance des différents objets célestes alors que nous sommes prisonniers de notre petite planète ? La plus simple de ces méthodes est la mesure d'une *parallaxe*, c'est-à-dire de la différence entre les positions angulaires d'un même objet, prises de deux endroits différents dont on connaît la distance relative.

La distance Terre-Soleil (l'unité astronomique, U.A.) fut évaluée à peu près correctement pour la première fois par Jean-Dominique CASSINI (1625/1712) et Jean RICHER en 1671, en mesurant la parallaxe de la planète Mars à partir de deux points différents sur Terre (Paris pour Cassini et Cayenne, en Guyane française, pour Richer). De leur évaluation de la distance Mars-Terre, ils purent remonter jusqu'à l'unité astronomique et obtinrent la valeur $140 \times 10^6 \text{ km}$, alors que la valeur acceptée aujourd'hui est de $149,5 \times 10^6 \text{ km}$. Une détermination plus précise de l'unité astronomique fut ensuite obtenue en observant le passage de la planète Vénus vis-à-vis du Soleil en 1761 et en 1769,⁹ à partir de plusieurs endroits différents sur la Terre.¹⁰

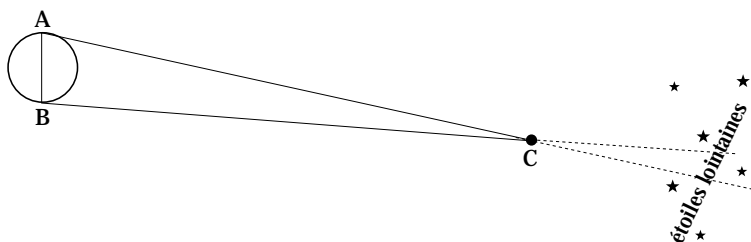


FIG. 9.2 : Schéma illustrant la méthode de la parallaxe. On mesure la position angulaire de l'objet C, c'est-à-dire les angles α et β (ou α et γ), à partir de deux points A et B. Connaissant la distance AB, on en tire la distance de l'objet (AC ou BC). Cette méthode suppose bien sûr la présence d'étoiles très éloignées qui servent de toile de fond et permettent de mesurer l'angle γ comme déplacement apparent de l'objet C sur la voûte céleste.

Or, rappelons que l'une des objections les plus sensées au système héliocentrique d'Arsitarque et de Copernic est l'absence de parallaxe des étoiles fixes lorsque la Terre se déplace le long de son orbite. On expliqua ce fait en presumant que les étoiles étaient très lointaines. William Herschel tenta en vain de mesurer cette parallaxe à l'aide de ses grands télescopes. Les premiers à y parvenir furent les astronomes allemands Friedrich Wilhelm BESSEL (1784/1846) et Friedrich Wilhelm Georg STRUVE (1793/1864) en 1838. La précision de ces mesures est remarquable : la parallaxe de l'étoile 61 *Cygni*, mesurée par Bessel, est en accord avec la valeur moderne de $0,30''$ (une fraction de seconde d'arc) à quelques centièmes de seconde près. En 1840, on mesura la parallaxe de l'étoile α *Centauri* : la valeur moyenne est de $0,76''$, ce qui place cette étoile à 4,3

⁹Ce passage ne se produit qu'à des intervalles de 113 et 130 ans.

¹⁰L'histoire retient surtout le voyage de l'astronome Guillaume LE GENTIL aux Indes pour observer ce passage. Son voyage d'aller dure un an. Une fois arrivé près de la colonie française de Pondichéry, il constate qu'elle est occupée par les Anglais, en guerre contre la France à ce moment, et il ne peut observer le passage de Vénus qu'à bord d'un navire, ce qui ne lui sert à rien. Il décide alors d'attendre le passage de 1769, huit ans plus tard, et profite de l'intervalle pour faire une croisière dans l'océan Indien et l'océan Pacifique. Une fois revenu à Pondichéry pour observer le second passage, un nuage isolé gâche tout ! Le Gentil revient en France en 1771 pour constater que ces héritiers, qui le pensaient mort depuis longtemps, s'étaient partagé ses biens...

années de lumière du système solaire (environ 6000 fois la dimension du système solaire). Il est clair que la méthode des parallaxes ne fonctionne que pour les étoiles les plus proches. En 1997, la sonde spatiale *Hipparcos* (Hipparque) a effectué des mesures de parallaxe sur des milliers d'étoiles rapprochées, permettant ainsi d'améliorer grandement la précision des échelles de distance astronomiques, qui reposent toutes sur les distances mesurées par parallaxe.

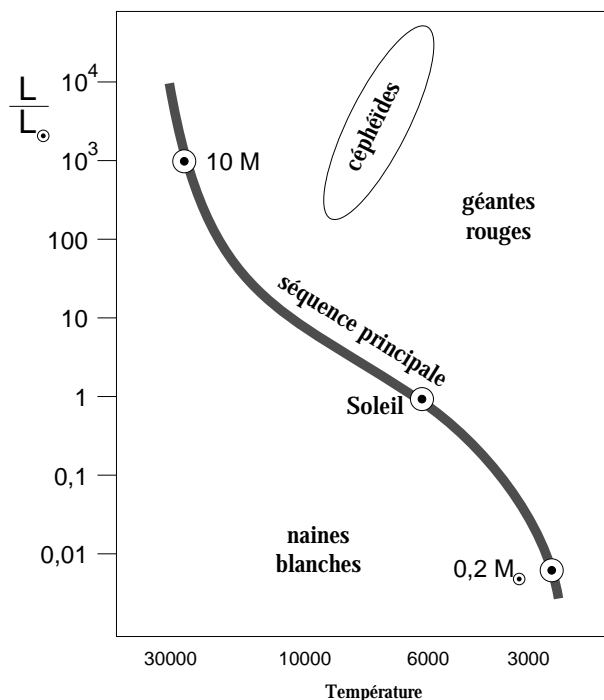
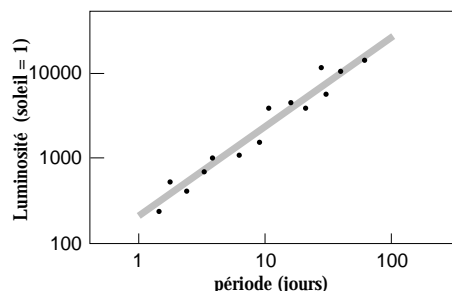


FIG. 9.3 : Diagramme de Hertzsprung-Russell. La plupart des étoiles se situent le long de la séquence principale. C'est la masse d'une étoile qui détermine sa position sur cette séquence. Quand une étoile comme le soleil a brûlé une grande partie de son hydrogène, elle sort de la séquence principale, devient une géante rouge pour ensuite devenir une naine blanche. Les étoiles plus massives ($M > 1,4M_{\odot}$) ont un destin différent : elles explosent (supernovae) ce qui en reste devient éventuellement une étoile à neutron ou un trou noir.

La magnitude absolue Au-delà de la méthode géométrique de la parallaxe, la physique des étoiles prend la relève pour nous aider à évaluer leurs distances. Rappelons d'abord que la *magnitude apparente* d'une étoile est un nombre m indiquant son éclat apparent, sur une échelle logarithmique (plus ce nombre est élevé, plus l'étoile est pâle). La *magnitude absolue* M d'une étoile est son éclat absolu, indépendamment de sa distance et est proportionnelle à la quantité d'énergie que cette étoile émet dans le spectre visible. Plus précisément, M est la magnitude qu'aurait apparemment un objet s'il était situé à une distance de 10 pc (1 pc ou parsec est la distance d'un objet offrant une parallaxe de 1 seconde d'arc, et vaut environ 3,2 année-lumière). Sachant que la luminosité apparente d'une étoile diminue comme l'inverse du carré de la distance, on peut calculer cette distance si on mesure la luminosité et si on connaît sa magnitude absolue. Or, au début de ce siècle, l'Américain Henry Norris RUSSELL (1877/1957) et le Danois Ejnar HERTZSPRUNG (1873/1967) découvrirent une relation entre la température d'une étoile, reliée à sa couleur, et sa magnitude absolue (ou luminosité). Voir à cet effet le diagramme de Hertzsprung-Russell schématisé à la fig. 9.3. Cette relation ouvrit la porte à la mesure des distances, en se basant sur une population d'étoiles dont les distances sont mesurable par parallaxe. On en vint à conclure que la Voie lactée a un diamètre d'environ 100 000 années-lumière (ou a.-l.), une distance tout à fait inaccessible à la méthode des parallaxes.

Une autre méthode approximative permet bientôt d'estimer des distances encore plus grandes. Une astronome américaine, Henrietta LEAVITT (1868/1921), découvrit en 1908, dans le nuage de Magellan (une galaxie irrégulière voisine de la Voie lactée et visible dans l'hémisphère sud) une catégorie d'étoiles dont

l'éclat varie avec le temps de manière périodique. On les appelle *étoiles variables* ou *céphéïdes*. Elle s'aperçut que la période de cette variation de luminosité est fonction de la luminosité absolue. Hertzsprung perfectionna la calibration de ce type d'étoiles, mesurant la distance de quelques céphéïdes par la méthode dite des parallaxes statistique, basée sur le mouvement propre du Soleil. La comparaison des céphéïdes situées au centre de la Voie lactée à celles situées dans le petit nuage de Magellan permet de conclure que ce dernier est situé à l'extérieur de la Voie lactée, soit à 190 000 a.-l. de nous.



(9.1)

Suite à ces découvertes, l'astronome Américain Harlow SHAPLEY (1885/1972) put cartographier la centaine d'amas globulaires qui appartiennent à notre galaxie. Un amas globulaire est une distribution sphérique d'étoiles pouvant en contenir de 10 000 à 100 000. Shapley découvrit que ces amas sont distribués de manière à peu près sphérique autour d'un point de la constellation du sagittaire qu'il conclut être le centre de l'Univers (en fait le centre de la Voie lactée). Une telle information ne peut être obtenue en observant les étoiles seulement, car la présence de poussière dans la Voie lactée en cache la majeure partie et peut faire croire, sur cette base seulement, que le Soleil est le centre de l'Univers (c'est à cette dernière conclusion qu'était parvenu l'astronome Kapteyn à la fin du XIX^e siècle). Par contre, les amas globulaires, très anciens, ne forment pas une distribution aplatie comme les étoiles, car ils se sont formés à une époque aussi reculée que la galaxie elle-même. De ce fait, on peut en voir la majeure partie car ils ne sont pas masqués par les nuages de poussière galactique, étant situés pour la plupart en dehors du plan galactique. La conclusion des travaux de Shapley est que le Soleil n'est qu'une étoile très quelconque située à la périphérie de la Voie lactée, à environ 30 000 a.-l. du centre. Ainsi, Shapley nous fait passer d'un univers héliocentrique à un univers galactocentrique. Un autre coup dur est porté à la vanité humaine, mais à cette époque elle commence à s'y habituer !

Les galaxies Il faut maintenant revenir aux nébuleuses. À la fin du XIX^e siècle, on avait dressé un catalogue (le *New General Catalog* ou NGC) d'environ 15 000 nébuleuses ou amas d'étoiles. L'utilisation de la photographie permit, par des temps d'exposition suffisamment longs, d'observer les nébuleuses avec beaucoup plus de clarté, ce que ne pouvait faire Herschel. Il était facile de distinguer les nébuleuses gazeuses (colorées) des nébuleuses blanches. Ces dernières ont des formes inusitées, souvent spirales. Au XVIII^e siècle, les philosophes Emmanuel KANT et Johann Heinrich LAMBERT avaient déjà émis l'hypothèse que les nébuleuses étaient des *univers-îles*, des mondes analogues à la Voie lactée et extérieurs à celle-ci. Cependant, il s'agissait d'une pure spéculation, ne reposant sur aucun fait. Au contraire, certains les considéraient, au XIX^e siècle, comme des systèmes planétaires en formation, car leur forme rappelait l'hypothèse nébulaire sur l'origine du système solaire, hypothèse formulée par Laplace dès 1796. Or, en 1923, l'astronome américain Edwin HUBBLE (1889/1953) découvre une céphéïde dans la nébuleuse spirale d'Andromède, et peut donc estimer la distance de celle-ci. Il conclut que cette nébuleuse est située à 900 000 a.-l. de nous, soit bien à l'extérieur de la Voie lactée.¹¹ Encore une fois, les limites de l'Univers sont repoussées.¹² On sait maintenant que l'Univers compte des milliards de galaxies. Par la suite, Hubble élaborait une série de critères visant à déterminer les distances des galaxies plus lointaines.

Ce qu'il faut retenir de ceci, c'est que la mesure d'une distance en astronomie n'est pas le résultat d'une observation directe, géométrique, sauf dans le cas des étoiles les plus proches et de notre système solaire.

¹¹Dans les années 1950, une recalibration des céphéïdes a multiplié cette distance par deux. Récemment (1997), la sonde Hipparcos [Hipparque] a encore augmenté cette distance. La galaxie d'Andromède est à environ 2,6 millions d'années-lumière de nous.

¹²Les nébuleuses gazeuses et les amas d'étoiles, eux, sont bien à l'intérieur de notre galaxie.

Au contraire, l'estimation des distances repose sur une chaîne d'hypothèses et de théories, certaines plus solides que d'autres. Cette remarque peut s'appliquer à toutes les sciences physiques et à tous les types de mesures : une théorie est toujours nécessaire pour interpréter les observations et celles-ci permettent en retour de vérifier ou d'élaborer de nouvelles théories, et ainsi de suite. La relation entre théorie et observation (ou théorie et expérience) n'est donc pas aussi simple qu'aimeraient le croire les positivistes radicaux.

Récession des galaxies lointaines Parallèlement aux travaux de Hubble, les astronomes V. SLIPHER (1875/1969) et M. HUMASON découvrirent le phénomène du *décalage vers le rouge* des galaxies. Expliquons : comme décrit au chapitre précédent, chaque élément possède un spectre spécifique d'émission lumineuse qui permet de l'identifier dans la lumière d'une étoile. Lorsqu'une étoile s'éloigne ou se rapproche de nous, ce spectre est légèrement décalé en raison de l'effet Doppler-Fizeau, vers le rouge dans le premier cas et vers le bleu dans le deuxième. Le déplacement du spectre par rapport à sa valeur normale permet de mesurer la vitesse de l'étoile par rapport à nous. Pour que ce déplacement soit mesurable, il faut cependant que cette vitesse soit énorme (une fraction d'un pour cent de la vitesse de la lumière). Or, Slipher et Humason ont constaté que certaines galaxies affichaient des décalages vers le rouge appréciables et donc qu'elles s'éloignent de nous. Hubble compara ces données avec son échelle de distance et arriva à la conclusion très simple que la vitesse de récession des galaxies éloignées est à peu près proportionnelle à leur distance. La valeur de la constante de proportionnalité est relativement incertaine, mais fixée aujourd'hui à environ 100 km/s par mégaparsec.¹³

9.2 Relativité générale et cosmologie

Les observations de Slipher, Hubble et Humason convergent vers un Univers en expansion, expansion d'autant plus rapide que les objets nous sont éloignés. Or, un peu avant cette découverte, en 1915, un développement théorique extraordinaire allait bouleverser notre vision de l'Univers, de l'espace et du temps : la théorie de la *relativité générale*, principalement développée par Albert EINSTEIN.

9.2.1 La théorie de la relativité générale

Le principe d'équivalence Rappelons qu'en 1905 Einstein publie sa théorie de la relativité restreinte, dans laquelle l'invariance de la vitesse de la lumière, conjuguée à l'équivalence de tous les référentiels d'inertie, mène à la conclusion que l'espace et le temps ne sont pas absolus, mais se mélangent l'un dans l'autre quand on passe d'un référentiel à un autre. Pour Einstein, la limitation imposée par l'usage de référentiels se déplaçant à des vitesses uniformes les uns par rapport aux autres est insatisfaisante et il se donne comme but de donner une description de la physique qui soit valable dans tout référentiel, accéléré ou non. Or, comme il est bien connu en mécanique élémentaire, l'observateur qui se situe dans un référentiel accéléré ressent des *forces fictives* (ou *forces d'inertie*). Par exemple, les occupants d'une fusée en accélération verticale ressentent une gravité apparente beaucoup plus grande que la gravité terrestre. Einstein constate le fait relativement simple que, pour un observateur prisonnier d'un environnement restreint (comme la cabine d'une fusée), il est impossible de distinguer cette gravité apparente de la gravité réelle, c'est-à-dire qu'aucune expérience réalisée dans la cabine ne pourrait faire la différence entre une fusée au sol et une fusée dans l'espace intersidéral subissant une accélération g (nous négligeons bien sûr les effets des vibrations, les fluctuations des moteurs, etc). Il érige cette observation au rang de principe : c'est le *principe d'équivalence*, d'après lequel il est toujours possible de choisir un système de référence accéléré pour annuler complètement la gravité apparente à un endroit donné : il s'agit de choisir un référentiel en chute libre. Ainsi, les astronautes à bord de la navette spatiale en orbite autour de la Terre sont en état d'apesanteur parce qu'ils sont en chute libre : la navette suit l'orbite naturelle d'un objet subissant l'attraction gravitationnelle de la Terre.

¹³Un *parsec* est la distance d'une étoile ayant une parallaxe de 1 seconde d'arc et vaut un peu plus de 3 années-lumière. Un mégaparsec est un million de parsec, soit un peu plus que la distance de la galaxie d'Andromède. Les galaxies situées à 100 mégaparsec de nous ont donc une vitesse de récession de 10 000 km/s.

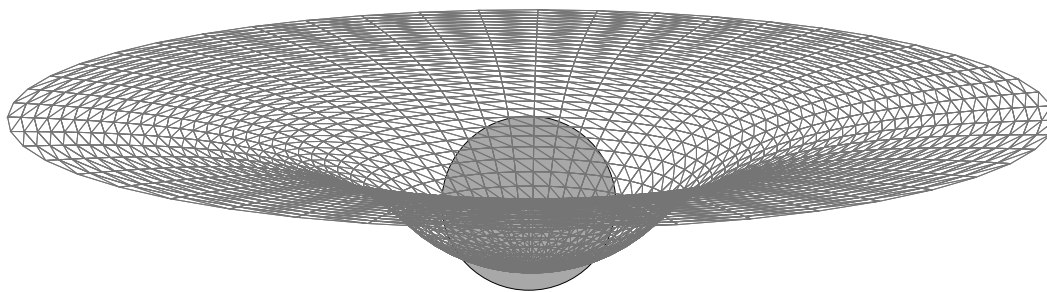


FIG. 9.4 : Schéma illustrant la courbure de l'espace à proximité d'un objet massif. Au contraire d'un espace plat, on ne peut pas, sur l'espace courbe, définir un système de coordonnées rectilignes, même si cela est approximativement possible à proximité de chaque point, sur un plan localement tangent à la surface courbe.

L'espace-temps courbe Résumons : il n'y a pas de différence détectable entre gravité apparente (causée par une accélération) et gravité réelle. Peut-on en conclure que la gravitation n'est qu'une illusion causée que par un choix de référentiel ? Pas vraiment, car le principe d'équivalence est un principe *local*, vérifiable dans un environnement restreint, mais ne s'applique pas à l'échelle de toute une planète comme la Terre. Il n'existe aucun référentiel accéléré qui pourrait annuler la gravité de la Terre partout en même temps ! L'idée géniale d'Einstein est d'avoir relié cette impossibilité à une *courbure* de l'espace-temps. Pour expliquer cette notion, considérons une surface plane à deux dimensions. Sur cette surface on peut choisir un système de coordonnées cartésiennes : par analogie avec l'espace-temps, l'une des coordonnées peut être l'espace (x) et l'autre le temps (t). Un tel système de coordonnées est l'équivalent d'un référentiel inertiel. On pourrait évidemment choisir un autre système de coordonnées, lui aussi cartésien, mais dont les axes ont subi une rotation par rapport aux axes précédents. Ce serait l'analogue d'un autre référentiel inertiel, se déplaçant à une vitesse constante et uniforme par rapport au précédent. Enfin, on pourrait choisir un système de coordonnées curvilignes, comme les coordonnées polaires, dont les 'axes' sont en fait des courbes. Ce serait l'analogue d'un référentiel accéléré. Or, même si l'emploi d'un système de coordonnées curvilignes est parfois pratique, il n'est nullement nécessaire dans le cas où l'espace (ou l'espace-temps) est parfaitement plat : on peut toujours trouver un système cartésien. Mais si l'espace est courbe, si par exemple la surface plane comporte une bosse ou une dépression quelque part, alors aucun système d'axes rectilignes n'est possible : nous sommes condamnés à utiliser un système curviligne. Bien sûr, près d'un point donné de la surface courbe, on peut dessiner des axes qui sont approximativement perpendiculaires et rectilignes dans un espace restreint (c'est l'analogue ici du principe d'équivalence), mais il est impossible de choisir un système partout rectiligne, en raison de la courbure de la surface.

Einstein en arrive à la conclusion que l'espace-temps à quatre dimensions est courbé par la présence de matière : chaque planète ou étoile courbe l'espace environnant, en proportion de sa masse. Il formule une théorie (1915) permettant de calculer précisément cette courbure et obtient la loi de la gravitation de Newton dans la limite des faibles courbures et des faibles vitesses ! De plus, il est capable de prédire des corrections à la loi de Newton. Cette théorie est appelée *relativité générale* et est une nouvelle théorie de la gravitation autant qu'une généralisation de la théorie de la relativité restreinte élaborée dix ans auparavant. La relativité générale fait largement appel à la géométrie riemannienne, un type de géométrie *non euclidienne* développée au XIXe siècle. Notons cependant que la formulation correcte de la théorie de la relativité générale fut un processus long et hasardeux. Einstein commit un certain nombre d'erreurs entre 1907 et 1915. Sa collaboration avec le mathématicien Marcel GROSSMANN, un ami de longue date, a été capitale. C'est Grossmann qui a initié Einstein aux méthodes mathématiques de la géométrie riemannienne et qui l'a poussé à corriger certaines de ces erreurs. Les équations de la relativité générale ont aussi été publiées par le célèbre mathématicien allemand David HILBERT (1862/1943), en même temps qu'Einstein, suite à une rencontre entre les deux hommes (1915) au cours de laquelle Einstein expliqua sa théorie encore incomplète.

Ainsi Einstein aurait pu fournir une réponse aux objections des Cartésiens à la théorie de l'attraction de Newton : il connaît la cause de cette attraction et elle ne se propage pas instantanément, mais à la vitesse de

la lumière. Le *plenum* de Descartes est ici remplacé par une réalité purement géométrique (l'espace-temps). Nous allons brièvement relater trois des confirmations expérimentales de la relativité générale : la déviation des rayons lumineux par le soleil, les modifications à l'orbite de Mercure et le décalage vers le rouge d'un faisceau lumineux causé par la pesanteur.

La déviation des rayons lumineux L'équivalence masse-énergie suggère qu'un faisceau lumineux, qui porte de l'énergie, pourrait être affecté par la gravité et donc dévié par un objet massif. C'est Planck qui suggéra à Einstein d'étudier cette question, en 1907. Einstein proposa une valeur pour la déviation des rayons lumineux d'une étoile passant à proximité du soleil. En principe cette valeur pourrait être mesurée par des observations effectuées lors d'une éclipse de soleil. Une expédition allemande, dirigée par l'astronome Erwin FREUNDLICH (1885/1964), se déplaça en Crimée (Russie) pour effectuer l'observation en juillet 1914, mais le déclenchement de la guerre entre l'Allemagne et la Russie interrompit son travail quelques semaines avant l'éclipse et la mesure ne put être effectuée. Si elle avait l'être, la mesure aurait démontré la réalité de cette déviation, mais elle aurait aussi démontré que les calculs d'Einstein sous-évaluaient la déviation par un facteur deux ! La théorie de la relativité générale n'étant pas encore correctement formulée en 1914, les calculs d'Einstein étaient tout simplement faux car basés sur la mauvaise théorie. Suite à la publication de la version définitive de la théorie fin 1915, l'astronome allemand Karl SCHWARZSCHILD (1873/1916) solutionna le problème de l'espace-temps courbe à proximité d'une étoile (ou de toute masse isolée) et démontra que la déviation attendue d'un rayon lumineux passant à proximité du Soleil était de $1,75''$ (un angle minuscule). En 1919, une autre expédition, dirigée cette fois par l'astronome anglais Arthur EDDINGTON (1882/1944), réussit à mesurer une déviation de $1,69'' \pm 0,50''$. La précision des mesures sera par la suite améliorée, mais pour Einstein ce fut le triomphe et la renommée mondiale. Il devint le héros du jour et demeura le scientifique le plus connu du monde jusqu'à sa mort.

L'avance du périhélie de Mercure La solution de Schwarzschild avait auparavant élucidé un autre mystère, celui de l'avance du périhélie de Mercure. L'orbite de la planète Mercure autour du Soleil est grosso modo elliptique, mais son périhélie (le point de son orbite le plus rapproché du Soleil) n'est pas toujours au même endroit, mais avance d'environ $250''$ à chaque siècle terrestre. On peut généralement expliquer un tel phénomène par l'influence des autres planètes sur Mercure (en particulier Jupiter) et par l'aplatissement du soleil. Or, un calcul de l'effet de Jupiter n'explique qu'en partie l'avance du périhélie. Il reste une avance résiduelle d'environ $40''$ qui ne peut être expliquée. Le Verrier, voulant répéter ici son exploit de la découverte de Neptune, formula l'hypothèse que Mercure était perturbée par une planète encore plus rapprochée du Soleil, planète hypothétique qu'il appela *Vulcain*. Le Verrier calcula les éléments de l'orbite de Vulcain qui, de toute façon, doit se trouver toujours très proche du Soleil, mais aucun astronome ne put jamais la détecter. Or, la théorie d'Einstein permet de calculer des corrections à la théorie de Newton et entre autres l'avance du périhélie de Mercure : on trouve $42,9''$ par siècle, en accord satisfaisant avec la précision des mesures actuelles.¹⁴

Le décalage vers le rouge Une autre prédiction de la relativité générale est le retard des horloges situées dans un champ gravitationnel plus intense : en principe, une horloge située au sous-sol retarde légèrement sur une horloge identique située au troisième étage. Ce retard se traduit par le décalage progressif vers le rouge d'un photon qui essaie de s'échapper de l'attraction terrestre (ou d'un astre quelconque). Par exemple, un photon d'une longueur d'onde précise émis au niveau du sol verra sa longueur d'onde augmenter légèrement lorsqu'il s'élève au-dessus du sol. La variation $\Delta\lambda$ prédite par la relativité générale est

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{gh}{c^2} \quad (9.2)$$

où h est la hauteur atteinte, g le champ gravitationnel à la surface de la Terre et c la vitesse de la lumière. Cette variation est infime, mais a pu être mesurée en 1959 par Pound et Rebka à Harvard, grâce à l'effet Mössbauer. Sur une hauteur de quelques mètres, ils confirmèrent la variation relative attendue de $2,5 \times 10^{-15}$ à 1% près.

¹⁴Pour éliminer l'aplatissement du soleil comme cause dominante de la précession, des comparaisons avec la précession correspondante de Mars sont nécessaires, et concluantes.

9.2.2 La théorie du “big bang”

L’Univers courbe Revenons maintenant à l’Univers en expansion. Dans les années 1920, Einstein et d’autres astronomes tentèrent d’appliquer la théorie de la relativité générale à l’Univers dans son ensemble. Pour progresser le moins possible, il faut supposer que la masse de l’Univers est répartie uniformément dans l’espace et non regroupée au sein de galaxies, de groupes de galaxies, etc. C’est une simplification assez monstrueuse en apparence, mais étant donné que l’Univers compte des milliards de galaxies, cela se compare un peu à supposer que la surface de la Terre est lisse alors qu’elle comporte un relief compliqué : à l’échelle de la planète, la différence importe peu. Le progrès principal en ce sens fut réalisé par un prêtre belge, l’abbé Georges LEMAÎTRE (1894/1966),¹⁵ qui énonça la théorie d’un Univers en expansion à partir d’un noyau primitif qui aurait explosé il y a des milliards d’années, lors du *big bang*. Pour comprendre un peu cette notion, figurons-nous l’espace-temps comme une sphère. Traçons sur cette sphère des méridiens et des parallèles. Les parallèles correspondent à des courbes à temps constant, c’est-à-dire à l’espace proprement dit, alors que le temps s’écoule le long des méridiens, vers le haut. Dans sa phase d’expansion, l’Univers se trouve dans l’“hémisphère sud” de cette sphère. Le cercle de l’espace se dilate au fur et à mesure, mais aucune galaxie n’est vraiment au centre de l’Univers et la vitesse de fuite des galaxies augmente proportionnellement à leur distance le long du cercle, comme constaté par Hubble. Une autre image est souvent donnée, en deux dimensions d’espace cette fois. Considérons l’Univers spatial comme un ballon en expansion (le temps n’est plus représenté comme un axe cette fois, mais comme un mouvement). Les galaxies correspondent à des points sur ce ballon et aucun point sur le ballon n’occupe une position privilégiée par rapport aux autres. Or, alors que le ballon se gonfle, les galaxies s’éloignent toutes les unes des autres, avec une vitesse proportionnelle à la distance qui les séparent. En fait, l’Univers n’est pas en expansion dans l’espace : l’espace lui-même est en expansion. De même, la question de ce qu’il y avait “avant” le big bang est sans objet, car le temps est apparu concurremment à l’espace ; dit un peu gauchement, le temps n’existait pas “avant” le big bang.¹⁶

L’abondance cosmique de l’hélium Le décalage vers le rouge des galaxies lointaines est une observation qui milite en faveur de la théorie du big bang, mais pas de manière sûre et déterminante. D’autres explications à ce décalage ont d’ailleurs été proposées. Il existe cependant des raisons plus solides d’accepter l’hypothèse du big bang : l’abondance d’hélium dans l’Univers. Les astrophysiciens ont, depuis les années 1930, perfectionné les modèles de la dynamique stellaire en y incorporant les lois de l’hydrodynamique, de la thermodynamique et de la physique nucléaire. De nos jours, ces modèles fonctionnent relativement bien. Il est possible, en se servant de ces modèles, de calculer la quantité des différents éléments légers qui auraient dû être produits par les étoiles depuis leur formation. Il est aussi possible d’estimer l’abondance des différents éléments dans l’Univers par des méthodes spectroscopiques. L’accord entre la théorie et l’observation est satisfaisant, sauf pour l’hélium où le désaccord est énorme : il y a beaucoup plus d’hélium dans les étoiles (25% de la masse de l’Univers) que ce qu’elles auraient pu produire par les réactions de fusion que l’on connaît. La solution à ce paradoxe est que la majeure partie de l’hélium de l’Univers aurait été produite dans une phase initiale de l’Univers, alors que celui-ci était suffisamment chaud dans son ensemble pour permettre cette réaction de fusion (on appelle cette production *nucléosynthèse primordiale*). Environ 100 secondes après le big bang, la température de l’Univers étant d’environ un milliard de degrés, des noyaux d’hélium ont commencé à être formés à partir des protons et des neutrons par une suite de réactions nucléaires analogues à celles qui ont lieu au cœur des étoiles légères comme le Soleil. Ces réactions ont duré jusqu’à ce que l’Univers soit vieux d’une douzaine de jours et qu’il se soit alors trop refroidi. On a calculé qu’à la suite de cette période, l’hélium représentait justement 25% de la masse de l’Univers, à peu de chose près ce qu’il représente aujourd’hui, la production d’hélium dans les étoiles étant négligeable en comparaison. Cette concordance entre abondance calculée et abondance observée de l’hélium est l’un des succès les plus importants de la théorie du big bang.

¹⁵Les ecclésiastiques sont très rares au panthéon scientifique. Mentionnons N. Copernic, G. Lemaître, G. Mendel, Giraud-Soulavie, R. Haüy.

¹⁶Notons ici la similitude entre ce point de vue et celui de Saint-Augustin, prétendant qu’il est absurde de se demander ce que Dieu faisait avant d’avoir créé le monde, car Dieu a créé le temps et l’espace en même temps, et donc l’expression “avant la création” n’a aucun sens.

Le rayonnement de fond cosmique Un autre succès de la théorie du big bang, encore plus important, fut la prédiction et l'observation du rayonnement de fond cosmique. Expliquons brièvement. En 1965, Arno PENZIAS et Robert WILSON, deux chercheurs des laboratoires Bell, observèrent un rayonnement micro-onde très isotrope, en provenance du ciel, tel que devrait produire un corps noir à une température de 3 degrés Kelvin. L'Univers baigne donc dans une distribution de photons thermalisée à 3K¹⁷. Or pour que des photons, produits d'une manière ou d'une autre, puissent être thermalisés, il faut que la matière environnante soit environ un milliard de fois plus dense que ne l'est l'Univers actuellement. La conclusion est que l'Univers a dû être un milliard de fois plus dense à un moment donnée de son histoire. À ce moment-là, la température de l'Univers était 1000 fois plus élevée (donc 3 000K). C'est alors que les atomes ont commencé à être formés, c'est-à-dire que les électrons ont été capturés par les noyaux. Ensuite, les photons thermalisés se sont découplés de la matière atomique et ont subi une expansion par un facteur 1000, ce qui les a refroidi d'autant, alors que la même expansion par un facteur 1000 diminuait la densité de l'Univers d'un facteur un milliard. L'existence de ce rayonnement de fond cosmique avait été anticipée par ceux mêmes qui avaient calculé l'abondance d'hélium primordial. En 1965, on avait commencé à étudier les moyens de détecter ce rayonnement, et c'est alors que la découverte fortuite de Penzias et Wilson vint confirmer son existence.

Au cours des dernières décennies, la *cosmologie*, l'étude de l'évolution de l'Univers dans son ensemble, a intégré les découvertes de la physique des particules élémentaires. Ces deux disciplines sont maintenant très voisines, ce qui est paradoxal à première vue, car l'une traite de l'infiniment petit et l'autre de l'infiniment grand. Cependant, le lien entre les deux disciplines se noue autour des premiers instants de l'Univers, alors qu'il est peuplé de particules de haute énergie. La cosmologie se distingue aussi par son caractère relativement spéculatif, aux confins du domaine de la méthode scientifique.

¹⁷ "Thermalisée" veut précisément dire "tel qu'émis ou produit par un corps noir de température donnée".

Chapitre 10

Géologie et évolution

Les lois fondamentales des sciences physiques peuvent être étudiées sans référence à l'évolution du monde ou à l'origine de l'Univers. Autrement dit, l'astrophysique et la cosmologie n'interviennent pas dans le cheminement des autres sciences physiques. Le cas de la géologie et, surtout, de la biologie, est très différent. L'évolution du monde vivant a été démontrée avant que les mécanismes de l'hérédité et les autres processus de la microbiologie soient connus. Plus important, il semble difficile de dissocier l'étude des processus de la vie de l'étude de l'évolution, car ces processus font partie d'un *héritage biologique* provenant des premières formes de vie. Ainsi, la vie elle-même est considérée comme un *phénomène unique*, aux multiples aspects, qui a débuté il y a plusieurs milliards d'années et qui est toujours en cours.

Ce chapitre est consacré, en un premier temps, à l'histoire des idées sur l'âge et la formation de la Terre et, dans un deuxième temps, à la découverte de l'évolution du monde vivant. Les deux sujets sont étroitement liés, car l'étude des fossiles a joué un rôle capital dans les deux cas. Ils ont aussi en commun d'échapper à nos sens en raison de leur lenteur. Ainsi, après l'infiniment petit du monde atomique et subatomique, après l'infiniment grand de l'Univers, nous voici dans l'*infiniment lent*. Encore une fois, l'être humain devra faire preuve d'imagination et d'abstraction pour échapper aux limites de ses sens.

10.1 La Terre en évolution

Au moyen-âge, le mot *géologie* désignait l'étude de toutes les choses terrestres, par opposition à célestes, de la minéralogie au droit civil ! Peu à peu, le terme vint à signifier l'étude scientifique de la Terre, en particulier des formations rocheuses.

Avant le déluge... L'influence de la Bible se fit longtemps sentir dans cette discipline. En 1654, l'archevêque irlandais USSHER affirmait, après une étude chronologique de la Bible, que le monde avait été créé en 4004 avant notre ère. Même un savant de la stature de Newton passa beaucoup de temps à établir des chronologies bibliques. Encore au XVIII^e siècle, on essayait d'expliquer l'origine des formations rocheuses par un déluge universel. Le prédicateur anglais John WESLEY (1703/1791) prétendait que les volcans et les tremblements de Terre n'existaient pas avant le péché originel. L'astronome anglais W. WHISTON annonçait en 1708, après de savants calculs, que le déluge avait commencé un mercredi 28 novembre (ancien style, bien sûr) ! On a aussi essayé de réconcilier l'existence de fossiles avec le récit biblique. Ainsi, les fossiles du quaternaire étaient attribués à des animaux ou des géants antédiluviens. En 1714, un certain Dr Cotton, de Boston, déclare que les restes d'un mammoth découverts près d'Albany sont ceux d'une race maudite existant avant le déluge. Une église de Valence, en Espagne, possédait une dent de Saint-Christophe qui n'était, en fait, qu'une dent d'éléphant fossile. Le fémur du même éléphant était réputé être le bras du Saint.

Couches sédimentaires Les premiers géologues durent lutter contre leur propre éducation pour reconnaître que la Terre était beaucoup plus ancienne que quelques millénaires. À ses débuts, la géologie s'intéresse surtout à la formation des chaînes de montagnes. L'observation la plus élémentaire à ce sujet est la présence de formations sédimentaires (en couches) même au sommet des plus hautes montagnes d'Europe (les Alpes). L'empilement régulier des couches rocheuses suggère fortement que ces formations sont le fruit d'une lente déposition (ou sédimentation) au fond des mers. Au XVII^e siècle, le géologue danois Niels Steensen (1638/1686), connu sous le nom de STÉNON, établit le principe de superposition des couches sédimentaires, qui repose sur deux hypothèses : (i) les couches étaient horizontale à l'origine, même si elles sont inclinées aujourd'hui et (ii) il y a continuité latérale des couches : elles s'étendent sur de très grandes distances et on peut les suivre d'une montagne à l'autre, voire d'une région à l'autre, même si leur orientation change en cours de route. Il s'agit du principe de base sur lequel reposera la géologie au XIX^e siècle.

Il est aussi de plus en plus admis, aux XVII^e et XVIII^e siècles, que les fossiles sont des restes d'animaux marins et cela ajoutait du poids à l'idée que la mer avait déjà recouvert des sols maintenant émergés.¹ En tentant de réconcilier cette observation avec le récit biblique, on prétendit que la sédimentation et le dépôt des fossiles étaient le fruit du déluge universel, qui dura 40 jours selon la Genèse. Le naturaliste français George Louis Leclerc, comte de BUFFON (1707/1788), fut le premier à réfuter cette courte période de sédimentation, en procédant à une expérience. Il arriva à la conclusion que la Terre avait au moins 75 000 ans. De plus, Buffon décrit plusieurs fossiles, qu'il assimila à des espèces d'animaux aujourd'hui disparues. Buffon publie ces idées en 1778, dans les *Époques de la Nature*, livre rapidement condamné par la faculté de théologie de l'Université de Paris. Un religieux français, Jean-Louis GIRAUD-SOULAVIE (1752/1813) porta la durée des temps géologiques à des centaines de millions d'années. Une réprobation de ses supérieurs le força à se retirer de l'étude de la géologie pendant un certain temps !

Le catastrophisme La géologie fournit un autre exemple de l'incapacité de nos sens à bien juger de l'immensité de la Nature. On ne pouvait imaginer dans les siècles passés que la Terre puisse évoluer, que les chaînes de montagnes puissent se former, car ces processus sont trop lents par rapport aux temps historiques. Certes, on connaissait des exemples d'îles volcaniques apparues soudainement, mais ces phénomènes étaient des catastrophes soudaines et l'on avait justement recours à de telles catastrophes (par exemple, le déluge) pour expliquer les phénomènes géologiques. La théorie selon laquelle les changements géologiques sont uniquement causés par des catastrophes soudaines porte le nom de *catastrophisme*.

En raison de l'omniprésence des fossiles, il est impossible de séparer géologie de paléontologie.² La question de l'évolution de la Terre est donc intimement liée à celle des espèces animales et végétales disparues. Le champion du catastrophisme en géologie et en paléontologie fut le Français George CUVIER (1773/1832), fondateur de l'anatomie comparée. Cuvier était un spécialiste des fossiles et des espèces disparues, mais croyait résolument au *fixisme*, c'est-à-dire à la non évolution des espèces, contrairement à son contemporain Lamarck (nous reviendrons sur ce point plus loin dans ce chapitre). En fait, Cuvier ne connaissait pas de formes animales fossiles intermédiaires qui auraient pu le convaincre que les espèces se transformaient graduellement les unes dans les autres.³ Il faut aussi souligner le contexte politico-religieux de l'époque. Cuvier intervient à l'époque de la restauration monarchique en France, après le renversement de Napoléon et la condamnation des idées séculaires de la révolution française. Une très forte réaction de droite se fait sentir et la religion connaît un regain d'influence. Or, le fixisme de Cuvier, même s'il n'est pas tiré du récit biblique, n'est pas en contradiction avec lui. En fait, Cuvier fait intervenir non pas un déluge, mais plusieurs déluges successifs, responsables de la disparition des espèces à des époques différentes. En Angleterre, où le conservatisme domine également, les idées de Cuvier sont très en vogue. Le Révérend William E. BUCKLAND (1784/1856), professeur de géologie à Oxford, publie en 1823 les *Reliquiæ Diluvianæ* (les "vestiges du Déluge"), une tentative de réconciliation de la paléontologie de Cuvier avec la Bible. Ce courant de pensée porte le nom de *théologie naturelle*, un calque de l'expression "philosophie naturelle" qui désigne les sciences physiques.

¹Rappelons que des savants chinois avaient émis cette opinion au VI^e siècle, et Bernard Palissy au XVI^e siècle.

²Littéralement, *paléontologie* signifie "étude des êtres anciens".

³Ces "chaînons manquants" sont d'ailleurs un problème auquel les biologistes sont encore confrontés aujourd'hui.

L'uniformitarisme Le géologue anglais Charles LYELL (1797/1875) publia de 1830 à 1833 ses *Principles of Geology*, dans lesquels il expose sa théorie, l'*uniformitarisme*, selon laquelle les changements géologiques sont lents et graduels et non le fruit de catastrophes soudaines. Selon Lyell et le français Constant PRÉVOST (1787/1856), les mêmes phénomènes qui ont mené à la formation des chaînes de montagnes se produisent encore aujourd'hui sous nos yeux, mais trop lentement pour que nous puissions les observer. On considère à juste titre Lyell comme le père de la géologie moderne.⁴

Les couches stratigraphiques Indépendamment de leur adhésion au fixisme ou au transformisme (évolution) des espèces, les géologues-paléontologues se sont attelés au XIXe siècle à leur tâche principale : le développement d'une échelle stratigraphique internationale, basée sur les fossiles, et qui permet de ranger les formations rocheuses dans l'ordre chronologique de leur apparition. À la fin du XIXe siècle, on avait divisé l'histoire de la Terre en cinq ères : le précambrien, le primaire, le secondaire, le tertiaire et le quaternaire. Chacune de ces ères, sauf le précambrien, était divisée en *périodes*. Par exemple, le secondaire est divisé en Trias, Jurassique et Crétacé. À son tour, chaque période est divisée en *étages*, etc. Il est important de comprendre que cette division en époques particulières était basée sur l'observation de la succession des strates géologiques et des fossiles qu'elles contiennent et qu'aucune durée particulière ne leur était associée au départ. En fait, une durée approximative leur était attribuée sur la base de la vitesse de sédimentation, ce qui est bien imprécis. Lyell croyait que le secondaire avait duré 80 millions d'années et que le début du primaire remontait à 240 millions d'années. À la fin du XIXe siècle, on croit plutôt que le début du primaire remonte à 700 millions d'années.

Géologie et radioactivité Vers la même époque, une controverse opposa les géologues au très renommé Lord Kelvin (William Thomson), devenu un monstre sacré de la science britannique. Kelvin avait calculé l'âge de la Terre en se basant sur sa température actuelle, sa température initiale supposée et son taux de refroidissement. Sa conclusion était qu'il ne s'était écoulé qu'entre 20 et 400 millions d'années depuis la consolidation du globe en une masse solide. Les géologues trouvaient cette durée trop courte, mais l'autorité de Kelvin était difficile à contester.⁵ La solution à ce dilemme apparut au tournant du XXe siècle avec la découverte de la radioactivité. D'une part, Kelvin avait supposé qu'il n'y avait aucune source de chaleur à l'intérieur de la Terre. Or, la présence de minerais radioactifs permet de prolonger la durée du refroidissement de la Terre car elle constitue une source de chaleur. D'autre part, la connaissance de la demi-vie de certains isotopes permet de dater avec précision les différentes époques géologiques. En étudiant les proportions des différents isotopes de plomb, la présence d'hélium et celle d'uranium dans les dépôts de minerais, on peut dater la formation de ces derniers. Cette méthode fut développée par Holmes et Wickman à la fin des années 1930. On arrive à la conclusion que la Terre s'est solidifiée il y a environ cinq milliards d'années (Fig 10.1). Elle est encore plus ancienne que ce que l'étude de la sédimentation pouvait laisser croire. La datation par radio-isotopes s'applique aussi aux périodes plus récentes. En particulier, la datation par radio-carbone (carbone 14), appliquée depuis 1949 par W.F. Libby, permet d'évaluer l'âge des objets d'origine vivante datant d'au plus une vingtaine de milliers d'années.

Tectonique des plaques La présence de roches sédimentaires au sommet des montagnes et le plissement évident des couches sédimentaires posa dès le XVIIIe siècle non seulement le problème de l'origine de cette sédimentation, mais aussi celui des transformations qui ont projeté ces formations rocheuses du fond de l'océan au sommet des montagnes. Des tentatives d'explications furent proposées très tôt : l'Allemand Abraham Gottlob WERNER (1750/1817) proposa que les océans recouvraient entièrement la Terre autrefois et que les roches sédimentaires ont été essentiellement formées sur place. Pour une raison quelconque, l'océan se serait ensuite retiré en grande partie dans les profondeurs de la Terre, laissant une partie de la surface terrestre à découvert. Cette théorie porte le nom de *neptunisme*, parce qu'elle attribue une origine marine aux formations rocheuses.⁶ Au contraire, l'Anglais James HUTTON (1726/1797) est partisan du *plutonisme*⁷ : les sédiments plus profonds de l'océan sont durcis par le 'feu central' de la Terre, qui est la source des plissements observés. Ce feu central est aussi responsable de l'élévation progressive des couches

⁴ Des études plus récentes ont donné un regain de vie au catastrophisme (thèse du météore responsable de la disparition des dinosaures). Cependant, les catastrophes ne font que s'ajouter aux processus géologiques graduels et ne les remplacent pas.

⁵Voir [60].

⁶Neptune est le dieu latin des océans (le Poséïdon grec).

⁷Pluton est le dieu latin des enfers.

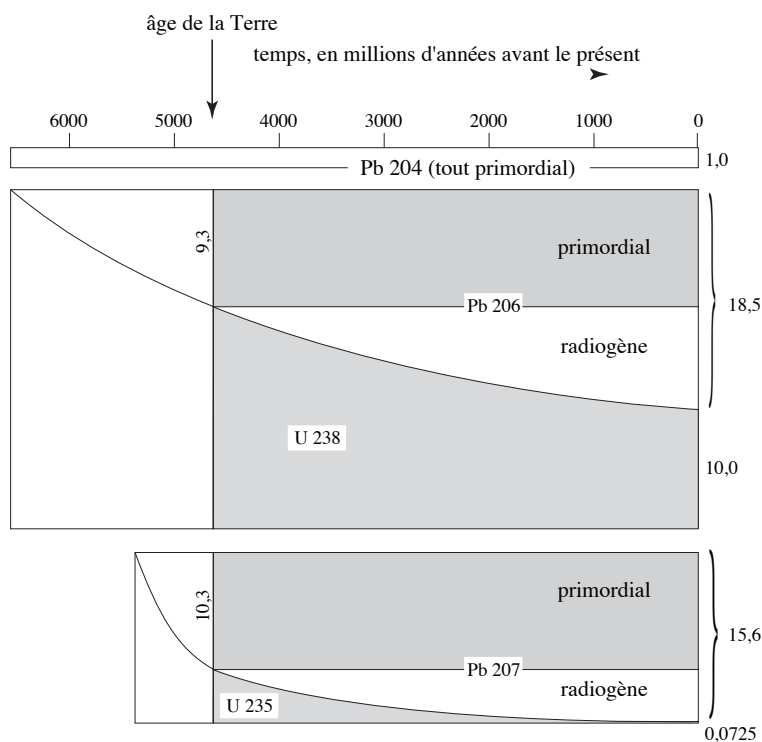


FIG. 10.1 : Explication schématisée de l'estimation de l'âge de la Terre par abondance isotopique. On considère trois isotopes du plomb : (i) Pb207, en partie radiogène (produit de désintégration de l'uranium 235) et en partie primordial (c'est-à-dire présent à l'origine) ; (ii) Pb206, aussi en partie radiogène (désintégration de l'uranium 238) et en partie primordial ; (iii) et Pb204, complètement primordial. Les proportions respectives du Pb204, Pb206 et Pb207 à notre époque peuvent être établies assez précisément par spectrométrie de masse : elles sont de 1 :18,5 :15,6. Ces proportions ont changé au cours du temps en raison de la désintégration des uraniums 238 et 235, dont on connaît les périodes. Les proportions lors de la formation de la Terre, c'est-à-dire avant que les désintégrations les affectent, peuvent être inférées de météorites ne contenant pas de trace d'uranium, et sont de 1 :9,3 :10,3. On peut dès lors trouver un moment dans le passé (il y a environ 4,6 milliards d'années) où les proportions des isotopes de plomb sur Terre étaient les mêmes que dans ces météorites, qu'on conjecture s'être formées en même temps que la Terre. C'est donc l'âge présumé de la formation de la Terre.

vers la surface et de la formation des montagnes. Cette vision finira par l'emporter sur le neptunisme au début du XIXe siècle.

Les mécanismes de la formation des chaînes de montagnes seront mieux compris au XXe siècle, par la théorie de la *dérive des continents*. L'Américain G.J. Taylor publia en 1910 l'idée que les continents sont mobiles. L'Autrichien Alfred WEGENER (1880/1930) développa une théorie de la dérive des continents en 1911. Selon cette théorie, tous les continents ne formaient qu'une seule masse à l'ère précambrienne, la *Pangée* (ou *Pangea*). Cette masse solide, qui flottait sur le manteau terrestre (un fluide très visqueux), se divisa et les différentes parties, ou *plaques tectoniques*, dérivèrent lentement. Le choc des plaques provoque des bourrelets de roches sédimentaires à leurs points de rencontre : là est l'origine des chaînes de montagne. Cette théorie ne fut pas reconnue tout de suite à sa juste valeur, car Wegener ne proposait pas de mécanisme expliquant cette dérive. Un tel mécanisme fut proposé par l'Américain D. GRIGGS en 1939 : celui des *courants de convection*. La différence de température entre les couches plus profondes et les couches superficielles de l'enveloppe terrestre provoque un mouvement de convection similaire à celui qui provoque les mouvements de l'atmosphère (les vents) et qu'on peut observer lors de la cuisson lente d'un liquide épais dans un chaudron : les parties plus chaudes remontent vers la surface, entraînant les parties plus froides vers le fond, où elles se réchauffent, et le cycle recommence. Ainsi, à l'échelle de la planète, ce mouvement fait

apparaître des zones d'émergence, comme au milieu de l'Atlantique, et des zones de subsidence, où une plaque glisse au dessous d'une autre, à la vitesse de quelques centimètres par an. Ces régions, où les plaques croissent ou se rencontrent, sont des zones sismiques actives où l'on retrouve l'essentiel des volcans.

10.2 L'histoire naturelle et l'évolution des espèces

10.2.1 La classification des espèces

L'*histoire naturelle* est, à proprement parler, l'étude du monde vivant dans sa variété et sa complexité.⁸ Bref, il s'agit de zoologie et de botanique. Les praticiens d'histoire naturelle sont appelés *naturalistes*.

Le premier problème auquel fait face le naturaliste devant l'énorme diversité des êtres vivants en est un d'inventaire et de *classification*. Nous avons vu qu'Aristote, excellent zoologiste, avait répertorié environ 500 espèces animales. Ce travail d'observation et de classification occupera les naturalistes longtemps avant qu'ils soient en mesure de proposer une théorie rationnelle sur l'origine de la diversité des espèces.

Le principal problème associé à la classification des espèces est celui des critères et des catégories à adopter. Certains naturalistes anciens, abandonnant toute théorie, se contentèrent d'arranger les espèces en ordre alphabétique ou selon des critères utilitaires (animaux domestiques versus sauvages, comestibles versus non comestibles, etc.). Les plus anciennes tentatives de classification théoriques invoquent l'*échelle des êtres* (*scala natura*), une hiérarchie de développement croissant à la base de laquelle se trouvent les minéraux, ensuite les végétaux, les animaux et, au sommet, l'être humain. Les êtres auraient été créés par Dieu dans l'ordre de perfection croissante : selon la Genèse, Dieu créa les végétaux (herbes et arbres) le troisième jour (avant le soleil !), les poissons et les oiseaux le cinquième jour, et les animaux terrestres (reptiles, bétail, etc.) le sixième jour. L'homme et la femme sont aussi créés le sixième jour, après tout le reste, et sont appelés à dominer la création. Certaines classifications théoriques des animaux font appel à la présence ou non de sang (comme Aristote), ou à la façon dont ces animaux sont générés : les animaux inférieurs (insectes, reptiles, petits mammifères) peuvent être engendrés directement de la terre ; les animaux supérieurs sont ovipares ou, mieux encore, vivipares. Malgré ces problèmes de classification, il se publie de plus en plus, au XVIe et XVIIe siècles, d'ouvrages illustrés d'histoire naturelle où diverses espèces animales et végétales sont décrites.

Le classificateur le plus connu de l'histoire de la biologie est certes le Suédois Carl von LINNÉ ou LINNEAUS (1707/1778). C'est de lui que vient la pratique, encore utilisée de nos jours, de désigner une espèce par le nom du genre, suivi d'un adjectif propre à l'espèce, et ce en latin. Par exemple, *Felis* désigne le genre des félins, dont quelques espèces sont *felis domesticus* (chat domestique), *felis catus* (chat sauvage), *felis leo* (lion), *felis tigris* (tigre), etc. Linné essayait de classer les espèces de la manière "la plus naturelle possible", en se basant principalement sur les ressemblances anatomiques. La hiérarchie des catégories est la suivante, de la plus particulière à la plus générale :⁹

individu → variété → race → espèce → genre → famille → ordre →
classe → embranchement → règne

La classification systématique de Linné repose sur le principe, fondamental selon lui, que les espèces et les genres ont une existence objective, qu'ils sont bien déterminés et différenciés. La définition moderne d'une *espèce* est la suivante : tout groupe de populations (animale ou végétale) pouvant se reproduire et engendrer des individus féconds. L'espèce est donc une "communauté de reproduction".

Le naturaliste français BUFFON adopte un point de vue contraire en s'opposant même à la notion d'espèce.

⁸Par opposition à la *microbiologie* et à la *biologie moléculaire*, apparues plus tard, qui s'intéressent à l'organisation à l'échelle de la cellule et aux processus microscopiques (physico-chimiques) de la vie.

⁹Les détails de la classification ont changé depuis Linné, certains niveaux hiérarchiques ont été ajoutés : sous-ordres, sous-classes, etc. Cette classification comporte encore un certain degré d'arbitraire et subit toujours des changements dans certains secteurs. Notons que les progrès de la biologie moléculaire permettent d'apparenter les diverses espèces selon des critères plus profonds que la simple morphologie (types de molécules biologiques utilisées, code génétique, etc.).

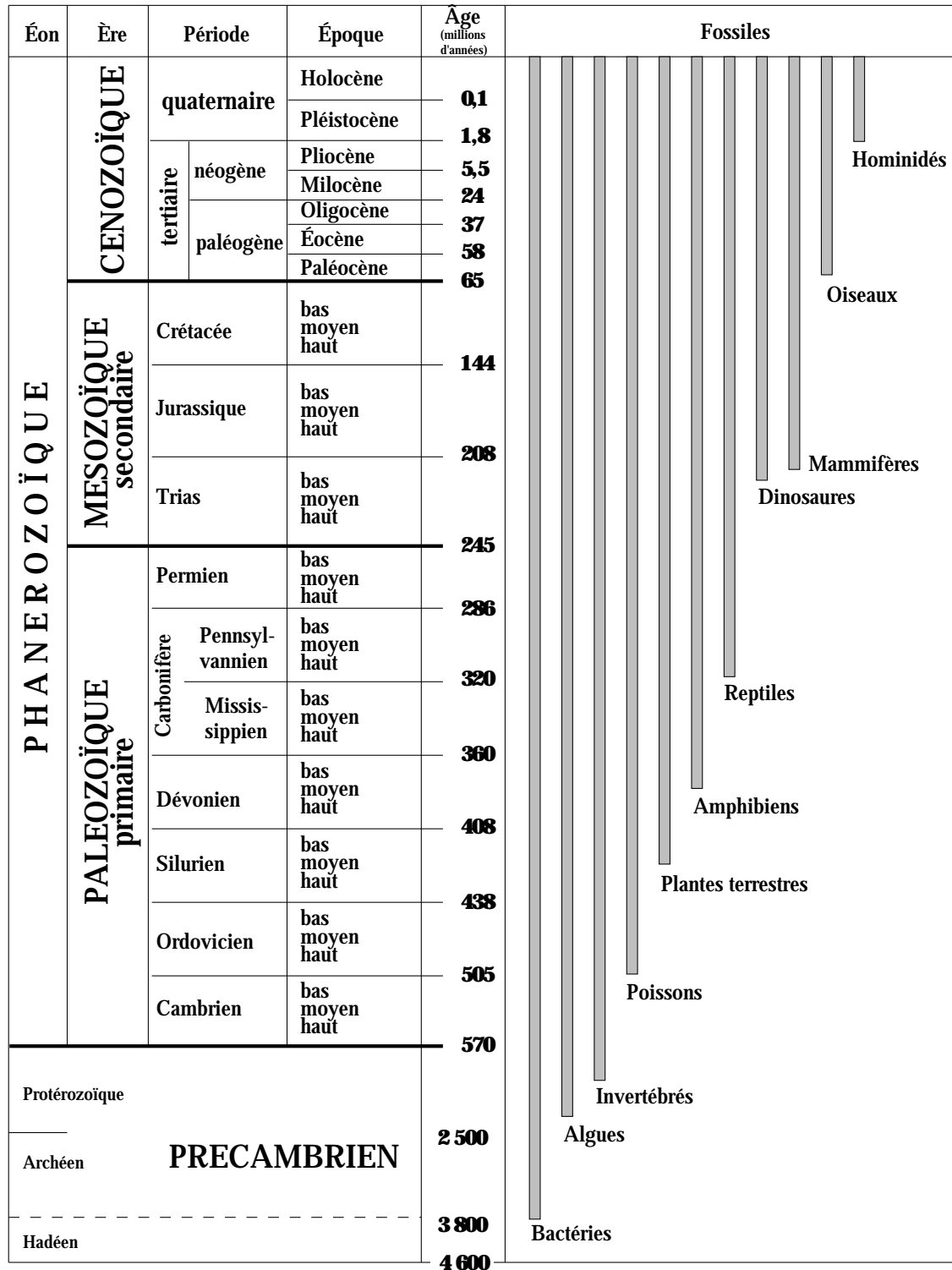


FIG. 10.2: Les grandes époques géologiques.

Buffon croit que “les genres, les ordres, les classes n’existent que dans notre imagination” et “qu’il n’y a dans la Nature que des individus”. Buffon devra cependant reconnaître que la classification systématique est très *utile* au naturaliste. Buffon place l’être humain parmi les autres animaux. En parlant de l’orang-outan, il affirme qu’on peut le tenir comme le premier des singes ou le “dernier des hommes, parce qu’à l’exception de l’âme, il ne lui manque rien de ce que nous avons, et parce qu’il diffère moins de l’homme qu’il ne diffère des autres animaux auxquels on a donné le même nom de singe”.

10.2.2 Fixisme contre transformisme

Le *fixisme* est la thèse selon laquelle les espèces animales et végétales n’évoluent pas et ont été créées telles quelles par Dieu lors de la Création du monde. Les espèces constituent une communauté de génération : nulle espèce ne peut être engendrée par une autre espèce.¹⁰ Bien entendu, cette thèse est inséparable du *créationisme*, qui en est un synonyme plus moderne. Linné croyait qu’il y avait autant d’espèces qu’il en avait été créé à l’origine. Le fixisme s’incrusta pendant un siècle à partir du milieu du XVIII^e siècle, mais marqua à certains égards un progrès par rapport aux croyances passées : plusieurs ajoutaient foi aux récits de femmes accouchants d’animaux ou de moisissures donnant naissance à des animaux inférieurs. Le fixisme s’oppose au *transformisme*, selon lequel les espèces évoluent dans le temps.

Cependant, dès le XVIII^e siècle, certaines observations étaient en contradiction avec le fixisme. La technique de l’hybridation des plantes permettait de changer certains caractères visibles d’une espèce. Vers la fin de sa vie, Linné lui-même adoptera un transformisme partiel : il accepta l’idée que des espèces nouvelles puissent apparaître à l’intérieur d’un même genre, tout en croyant que les genres eux-mêmes sont fixes.¹¹ Buffon est un partisan du transformisme partiel et envisage les diverses causes de transformation des espèces : le climat, l’alimentation et la domestication. Buffon expose ces idées dans son livre *La dégénération des animaux*, dans lequel il tente de réduire le nombre des genres. Il pose même la question de la parenté des espèces du Nouveau Monde et de l’Ancien. Si Buffon n’a probablement pas envisagé que tous les animaux proviennent d’un ancêtre unique, cette hypothèse a été avancée par un autre naturaliste français, Pierre-Louis Moreau de MAUPERTUIS¹² (1698/1759). Dans un ouvrage publié sous un pseudonyme, il affirme que tous les animaux sont “venus d’un même animal qui, dans la succession des temps, a produit, en se perfectionnant et en dégénéralant, toutes les races des autres animaux [...] L’on aurait pas tort de supposer que, d’un seul être, [la Nature] a su tiré, avec le temps, tous les autres êtres organisés”. Maupertuis conçoit que tout individu provient de la combinaison de *molécules séminales* provenant des parents et qu’il peut arriver que ces molécules se combinent de façon anormale, donnant naissance à des êtres anormaux qui peuvent être la souche d’espèces nouvelles. C’est là un concept précurseur de celui de mutation génétique, qui ne sera établi par de Vries que 150 ans plus tard.

Le champion du transformisme à l’aube du XIX^e siècle est le Français Jean-Baptiste de Monet de LAMARCK (1744/1829). Lamarck avait été engagé par Buffon au Jardin du Roi (le futur *Jardin des Plantes* de Paris). Il reçut plus tard la tâche de classer les spécimens d’animaux inférieurs du jardin, ce qui lui fit prendre conscience des difficultés associées à une telle classification et le poussa vers sa conception du transformisme, qu’il publia dans sa *Philosophie zoologique* en 1809. Selon Lamarck, les besoins des individus dans leur milieu sont la cause de l’apparition ou de la modification progressive d’organes, et la non-utilisation d’un organe cause progressivement sa disparition. Les changements imperceptibles chez chaque individu sont transmis à la génération suivante : c’est l’*hérédité des caractères acquis*. Cette thèse est encore appelée *lamarckisme*. Citons Lamarck :

Ainsi, la girafe contrainte de brouter les feuilles des arbres s’efforce d’y atteindre ; cette habitude sévissant depuis longtemps chez tous les individus de l’espèce, a entraîné des modifications utiles de la forme ; les jambes de devant sont devenues plus longues que celles de derrière et le cou s’est allongé suffisamment pour atteindre des branches à 6 m de hauteur. Citons aussi deux lois que Lamarck énonce sur l’évolution :

¹⁰Le cas des individus est plus subtil. La mule, croisement du cheval et de l’âne (deux espèces différentes), est cependant stérile.

¹¹Cette affirmation de Linné, si on y réfléchit bien, paraît vide de sens, car seules les espèces ont une définition opérationnelle véritable, en tant que communautés de génération.

¹²Aussi mathématicien, physicien et philosophe.

Première loi. Dans tout animal qui n'a point dépassé le terme de son développement, l'emploi plus fréquent et soutenu d'un organe quelconque fortifie peu à peu cet organe, le développe, l'agrandit et lui donne une puissance proportionnée à la durée de cet emploi, tandis que le défaut constant d'usage de tel organe l'affaiblit insensiblement, le détériore, diminue progressivement ses facultés, et finit par le faire disparaître.

Deuxième loi. Tout ce que la nature a fait acquérir ou perdre aux individus par l'influence des circonstances où leur race se trouve depuis longtemps exposée, et, par conséquent, par l'influence de l'emploi prédominant de tel organe, ou par celle d'un défaut constant d'usage de telle partie, elle le conserve par génération aux nouveaux individus qui en proviennent, pourvu que les changements acquis soient communs aux deux sexes, ou à ceux qui ont produit ces nouveaux individus.

Les idées de Lamarck, exposées dans sa *Philosophie zoologique*, seront plutôt mal reçues. Premièrement, l'auteur n'avait pas très bonne réputation parmi les savants : son style était embrouillé, ses idées spéculatives et ses croyances face à d'autres secteurs scientifiques très en retard (il s'en tenait encore à la théorie des quatre éléments d'Empédocle). Deuxièmement, l'époque (1809) n'était pas propice à l'acceptation d'une théorie aussi spéculative.

Geoffroy Saint-Hilaire Cependant, l'étude des fossiles révèle des parentés entre les espèces disparues et les espèces actuelles, liens de parenté qui ont souvent l'apparence de liens de filiation. Le Français Étienne Geoffroy Saint-Hilaire (1772/1844), ami de Lamarck et transformiste comme lui, propose la théorie des *archétypes*. Par exemple, selon cette théorie, les membres divers des espèces actuelles (les bras et les jambes des humains, les ailes des oiseaux, les nageoires des poissons) dérivent tous d'un archétype initial chez une espèce disparue. "Il n'y a, philosophiquement parlant, qu'un seul animal, modifié par quelques retranchements ou par de simples changements dans la proportion des parties." Autrement dit, la nature n'a qu'un seul plan, qui a été légèrement modifiée d'une espèce à l'autre, mais dont la structure de base est la même pour tous. Geoffroy Saint-Hilaire se donne pour but d'établir la correspondance existant entre l'anatomie des différentes espèces. À l'encontre de Lamarck, Geoffroy Saint-Hilaire ne croyait pas aux changements graduels, mais plutôt aux changements brusques, ce qui expliquait les chaînons manquants. Il fit le parallèle entre le développement d'une espèce depuis les premiers temps et le développement d'un embryon appartenant à cette espèce. Cette idée porte d'ailleurs le nom de *parallélisme*.¹³ Geoffroy Saint-Hilaire n'est cependant pas le premier à concevoir que des organes ou structures anatomiques puissent être le fruit d'une différenciation à partir d'une structure commune. Dès 1790, Johann Wolfgang von GOETHE (1749/1832), la gloire de la littérature allemande, eut l'idée, en examinant le crâne d'un mouton, que ce crâne était formé de vertèbres, comme si les dernières vertèbres, au cours de l'évolution ou du développement de l'embryon, s'étaient différenciées pour former le crâne. L'Allemand Lorenz OKEN (1779/1851) aura la même idée en 1805. L'Anglais Richard OWEN (1804/1892), spécialiste de l'anatomie comparée, non seulement défendra par de multiples observations le parallélisme, mais y ajoutera la notion d'"arbre généalogique", c'est-à-dire la possibilité d'un ancêtre commun à toutes les espèces. Mais cette idée avait déjà été formulée, de manière plus vague, par Maupertuis et par Lamarck.

Cuvier George CUVIER fut recruté par Geoffroy Saint-Hilaire pour venir travailler à Paris avec lui, au jardin des plantes. Il fut rapidement reconnu comme le chef de file de l'histoire naturelle en France et domina son époque. Cuvier est un esprit positif, qui se refuse à formuler trop d'hypothèses non directement justifiées par les faits. Cette attitude lui fait rejeter les vues de Lamarck sur l'évolution, qui "n'étaient pas assez dangereuses pour être attaquées". Rappelons que Cuvier croyait au fixisme des espèces et à leurs disparitions complètes et soudaines lors de catastrophes (catastrophisme), après lesquelles de nouvelles espèces sont formées, soit par génération spontanée ou par l'action divine (Cuvier ne se prononce pas de manière catégorique). En fait, l'opposition de Cuvier au transformisme est tout à fait justifiée d'un point de vue scientifique : Cuvier découvre une variété d'espèces toujours plus grande à mesure que de nouveaux types de fossiles sont découverts, mais aucun "chaînon manquant" permettant d'appuyer les thèses transformistes. Cependant, on peut lui reprocher de ne pas avoir tiré de conclusions du fait que les couches

¹³Geoffroy Saint-Hilaire n'ira pas jusqu'à affirmer que le développement de l'embryon le fait passer par les étapes de l'évolution de son espèce. C'est le zoologiste allemand (naturalisé brésilien) Fritz MÜLLER (1821/1897) qui l'affirmera le premier, suivi en cela par l'Allemand Ernst H. HAECKEL (1834/1919), grand défenseur et protagoniste du darwinisme.

géologiques inférieures (donc plus anciennes) révèlent des animaux plus éloignés de la faune actuelle que les couches plus récentes, un argument de taille en faveur d'une évolution des espèces et que ne peut expliquer une nouvelle création après chaque catastrophe.

Une dispute célèbre opposa Cuvier à Geoffroy Saint-Hilaire en 1830, suite à la déposition d'un mémoire par des tiers sur les mollusques céphalopodes. Geoffroy Saint-Hilaire y cherchait, *a posteriori* sans fondement, des indices d'un parallélisme avec les vertébrés. Cuvier s'opposa à cette tentative qu'il jugeait, avec raison, trop spéculative. Cuvier était donc perçu comme un défenseur de la prudence et de la rigueur, contrairement à ces adversaires transformistes.

10.2.3 Le darwinisme

Les principaux défauts de la théorie de Lamarck sont (i) qu'elle ne propose aucun mécanisme par lequel s'effectuent les transformations graduelles de caractères et (ii) qu'elle ne s'appuie pas sur une base suffisamment solide d'observations. Le naturaliste anglais Charles DARWIN (1809/1882) ne fera pas la même erreur. Il proposera le premier une explication partielle de l'évolution dans son ouvrage *On the Origin of Species by Means of Natural Selection* (Sur l'origine des espèces au moyen de la sélection naturelle), paru en 1859. Cette ouvrage est extrêmement bien documenté : Darwin mit 20 ans à l'élaborer. On peut résumer, d'après Ernst Mayr, la théorie de Darwin en cinq points :

1. *L'évolution* : le monde est suffisamment ancien pour permettre l'évolution des espèces.
2. *L'ascendance commune* : toutes les espèces, tous les organismes vivants, ont un ancêtre commun. Plus on remonte loin dans le passé, plus on découvre un lien de parenté avec de nombreuses espèces.
3. *La multiplication des espèces* : une espèce peut donner naissance à des espèces filles qui évoluent différemment en raison de l'isolement géographique.
4. *Le gradualisme* : l'évolution est un phénomène lent et progressif. *Natura non facit saltum* (la nature ne fait pas de sauts).
5. *La sélection naturelle* : dans une population animale ou végétale, les plus aptes survivent le mieux, se reproduisent avec plus de probabilité et leurs caractères sont transmis préférentiellement.

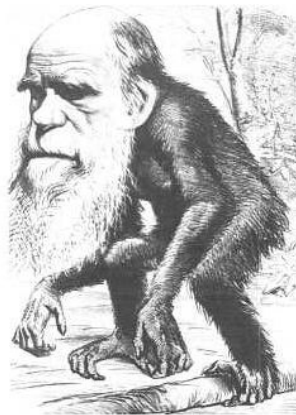


FIG. 10.3: Charles DARWIN (1809/1882)

Ce dernier point est le plus important et constitue l'essentiel de la contribution originale de Darwin. Celui-ci ne connaît pas la notion de mutation génétique, découverte plus tard, mais admet la possibilité de variations aléatoires des caractères (ensuite transmises aux descendants), sans lesquelles la sélection naturelle ne peut opérer. La sélection naturelle est donc un mécanisme évolutif reposant à la fois sur le hasard des variations et la pression de l'environnement.

Darwin, même s'il ne publia sa théorie qu'en 1859, l'avait en grande partie conçue beaucoup plus tôt. À 22 ans, à sa sortie de Cambridge, il s'embarque sur le *Beagle* pour un voyage d'exploration de cinq ans autour

du monde, principalement en Amérique du Sud et dans quelques îles du Pacifique, dont les Galapagos. Là il fait de nombreuses observations d'où il tirera ultérieurement les arguments en faveur de sa théorie. En particulier, il observe des espèces d'oiseaux apparentées, vivant sur des îles différentes de l'archipel des Galapagos et conclut que l'isolement géographique de deux populations appartenant à la même espèce permet une évolution différente des deux populations et à la longue la différenciation de deux espèces. La notion de *population* acquiert alors toute son importance.

Darwin fut influencé par deux de ses compatriotes. Premièrement par Charles Lyell, dont les *Principles of Geology* influencèrent sa conception gradualiste de l'évolution (changements lents et imperceptibles). Quand à son idée de sélection naturelle et de lutte pour la survie, elle fut fortement influencée par l'œuvre de Thomas R. MALTHUS (1766/1834), intitulée *An Essay on the Principle of Population* (Essai sur le principe de population), parue en 1798. Dans cet ouvrage, Malthus soutient qu'une population en croissance libre croît de manière exponentielle (ou géométrique) et que la quantité limitée de ressources mène forcément à une compétition pour l'obtention de ces ressources et que les individus les plus aptes et les plus forts finissent par l'emporter. Malthus raisonne surtout à l'échelle humaine et prône le contrôle des naissances. Darwin étend cette idée à tout le monde vivant. En fait, Darwin connaissait bien la sélection artificielle, pratiquée par les éleveurs d'animaux, qui permet de développer les caractères voulus chez une race en peu de générations. Darwin l'expérimenta lui-même sur les pigeons. De sélection artificielle à sélection naturelle, il n'y a qu'un pas.

En 1858, Darwin eut connaissance qu'un autre naturaliste, Alfred Russell WALLACE (1823/1913), s'apprêtait à publier un mémoire dans lequel des idées très semblables (le principe de sélection naturelle) étaient développées. Darwin rassembla donc ses travaux et commença la rédaction de *On the origin of species...*, qu'il publia l'année suivante. La première édition de 1250 exemplaires fut épuisée en une semaine. Cet ouvrage marque une étape très importante dans l'histoire de la biologie et eut un grand succès (traduction française en 1862). Un mémoire ancien de Darwin (1844) fut présenté à la société Linéenne, en même temps que celui de Wallace, ce qui permit d'établir la priorité scientifique de Darwin, ce en quoi Wallace était tout-à-fait d'accord (il demeura toujours un grand admirateur de Darwin). Sur la sélection naturelle, citons Wallace :

Le nombre des animaux qui meurent chaque année doit être immense, et, comme l'existence de chaque individu dépend de lui-même, les plus faibles, c'est-à-dire les plus jeunes, les malades, doivent disparaître, tandis que les plus sains et les plus vigoureux peuvent seuls prolonger leur vie, étant plus capables de se procurer régulièrement leurs aliments. C'est, comme nous le disions, une lutte pour l'existence, dans laquelle les êtres les moins parfaits doivent toujours succomber.

La réaction au darwinisme L'œuvre de Darwin (*On the origin of species...*) suscita des réactions extrêmement vives dans les milieux fixistes et, surtout, religieux. Même si Darwin ne l'écrivait pas explicitement en 1859, il était clair que ses idées faisaient de l'humain un animal comme les autres, descendant d'une forme de vie inférieure. D'autres l'avaient affirmé avant Darwin, mais la preuve de Darwin était beaucoup plus convaincante, et donc insupportable pour les tenants d'une place privilégiée dévolue à l'être humain. Darwin publia un autre ouvrage, encore plus controversé que le premier, en 1871 : *The Descent of Man, and Selection in Relation to Sex* (De la descendance de l'homme). De cette époque date l'expression "l'Homme descend du singe", caricature de la thèse de Darwin selon laquelle l'être humain et les primates ont des ancêtres communs. Le darwinisme enlève à l'être humain son statut particulier parmi les créatures vivantes. Un ecclésiastique anglais déclara qu'il ne trouvait pas dans la langue anglaise de terme suffisamment bas pour flétrir Darwin et ses disciples. Ce dur conflit entre évolution et religion dure encore aujourd'hui, un de ses champs de bataille étant l'enseignement de la biologie au niveau secondaire, en particulier aux États-Unis. Des groupes religieux fondamentalistes tentent d'opposer à la théorie de l'évolution une théorie qu'ils prétendent scientifique, le *créationisme*, selon laquelle toutes les espèces ont été créées telles quelles, en même temps (par Dieu, présumément). Il s'agit bien sûr d'un retour au fixisme ; même si une telle opinion était scientifiquement défendable du temps de Cuvier, elle ne l'est plus du tout aujourd'hui. Cependant, point n'est besoin d'être créationiste pour critiquer le darwinisme.

Les abus et la réforme du darwinisme À la fin du XIXe siècle, certains, dont A.R. Wallace, exagèrent l'efficacité de la sélection naturelle et en vinrent à prétendre que tous les caractères doivent être utiles, puisqu'ils sont le fruit de la sélection naturelle. Cependant, ceci est manifestement faux et on peut citer chez plusieurs espèces quantité de caractères dont l'utilité est douteuse. La Nature est beaucoup trop complexe et variée pour se laisser gouverner sans faille par une loi aussi simple que la sélection naturelle, aussi ingénieuse soit-elle.

Dans les années 1920 et 1930 se forme une synthèse du darwinisme et des découvertes plus récentes de la génétique. Darwin ne donne aucun mécanisme à la variabilité des caractères au sein d'une population. Or, depuis les travaux du Hollandais Hugo de Vries (1848/1935) et de l'Américain Thomas Hunt Morgan (1866/1945), on sait que des changements de caractère fortuits, appelés *mutations*, peuvent se produire d'une génération à l'autre (une discussion de la génétique est reportée au chapitre suivant). Ces mutations fortuites, en plus du mélange des gènes reliés à la reproduction sexuée, seraient à l'origine de la variabilité aléatoire à l'intérieur d'une population et la sélection naturelle servirait de guide à l'évolution du patrimoine génétique de cette population. Cette version "mise à jour" du darwinisme porte le nom de *théorie synthétique de l'évolution* ou de *néo-darwinisme*.

Signalons que cette théorie ne fit tout de même pas l'unanimité parmi les biologistes. Au début du XXe siècle, le lamarckisme eut un regain de popularité, notamment en France, mais de manière plus spectaculaire en U.R.S.S., où il devint la doctrine officielle pendant un certain temps, sous l'influence de Trofim Denisovitch LYSENKO (1898/1976), botanicien qui prétendait que les caractères du porte-greffe étaient transmis aux descendants du greffon. Il est vrai qu'en un sens le darwinisme accepte l'hérédité des caractères acquis, mais c'est ici une querelle de mots : dans un cas (lamarckisme) les caractères sont acquis par l'usage et le non usage (présélection) et dans l'autre cas (néo-darwinisme) ils sont acquis au hasard des mutations, transmissibles par essence, mais sujets à la sélection naturelle (post-sélection).

L'état actuel du darwinisme La théorie de l'évolution par la sélection naturelle est séduisante, certes, mais n'a pas un statut de certitude comparable à celui des théories qui peuvent être soumises au test de l'expérience. La théorie de l'évolution a ceci en commun avec la cosmologie et la géologie qu'elle repose uniquement sur des *observations* et des hypothèses raisonnées pour les expliquer *a posteriori*. La plupart des théories standards des sciences physiques et de la microbiologie, au contraire, a fait l'objet d'*expériences*, c'est-à-dire d'observations provoquées par l'être humain et guidées par des théories ou des observations antérieures. La sévérité d'un contrôle imposé par l'expérimentation est bien plus grande que celle découlant de la seule observation.¹⁴

En particulier, la nécessité de chaînons manquants, qui motiva l'opposition de Cuvier au transformisme, pose toujours un problème. Comment expliquer que les fossiles ne démontrent pas une continuité dans l'évolution des espèces ? Une explication possible est que la fossilisation ne se produit pas de manière continue, mais seulement en certaines circonstances, à certaines époques (d'habitude, les restes d'animaux et de plantes ne sont pas fossilisés, mais décomposés par putréfaction ou consommés par d'autres espèces). Autrement dit, les fossiles ne donneraient qu'un portrait instantané de la faune et de la flore à une certaine époque. Malheureusement, cette explication n'a comme mérite que d'éliminer les témoins gênants au darwinisme strict et ne fait que reporter le problème.

Une autre explication repose sur une modification du darwinisme : c'est la théorie des *équilibres intermittents*, de l'Américain Stephen Jay GOULD. Cette théorie avance l'hypothèse que l'évolution comporte une composante lente et graduelle, gouvernée par les mutations aléatoires et la sélection naturelle, plus une composante subite dont l'action est très rapide et qui consiste en *sauts évolutifs* (le recours à des sauts évolutifs porte le nom de *saltationisme*). Autrement dit, les espèces sont relativement stables pendant très longtemps (d'où le mot "équilibre") et soudainement les variations se multiplient et un grand nombre de formes et caractères différents apparaissent en relativement peu de temps. Ceci explique les chaînons manquants chez les fossiles, car la population des fossiles s'établit essentiellement pendant les périodes d'équilibre. L'explosion du Cambrien, une période de quelques millions d'années pendant laquelle une très grande variété d'espèces fit son apparition il y a environ 600 millions d'années, serait un exemple de rupture d'équi-

¹⁴Une discussion de la distinction entre observation et expérience se trouve dans l'ouvrage classique de C. BERNARD [7].

libre.

Il reste que le darwinisme ne donne pas d'explication satisfaisante de l'origine de la vie et que le développement d'organismes (ou d'organes) sophistiqués par la seule action des mutations au hasard et de la sélection naturelle est difficile à croire. Darwin lui-même disait : "Il semble absurde au possible, je le reconnais, de supposer que la sélection naturelle ait pu former l'oeil." Bref, si pratiquement aucun biologiste ne remet en cause aujourd'hui le phénomène d'évolution et l'origine commune des espèces, le mécanisme précis de cette évolution et les "forces" en cause ne font pas l'unanimité.

Chapitre 11

Les mécanismes de la vie

11.1 La révolution anatomique et physiologique

La médecine antique, principalement celle du corpus hippocratique et des oeuvres de Galien, a complètement dominé le moyen-âge, en y prenant une forme dogmatique repoussant l'expérience et l'innovation. Comme les autres domaines du savoir, la médecine avait besoin d'une révolution, d'un retour à l'attitude plus scientifique d'Hérophile et d'Érasistrate.

Vésale Le dégel viendra en bonne partie d'un anatomiste flamand, André VÉSALE (1514/1564), qui effectua des dissections dès l'adolescence. Supérieurement doué, il étudie la médecine à Paris, à Louvain puis à Padoue, qui abritait la meilleure école de médecine de l'époque. Arrivé à Padoue pour y effectuer une maîtrise, ses maîtres furent si impressionnés par l'étendue de ses connaissances qu'ils lui conférèrent un doctorat avec mention après deux jours d'examen et l'invitèrent à se joindre à la faculté. Padoue était l'endroit idéal pour pratiquer l'anatomie : Vésale bénéficiait de la collaboration de la justice locale, qui lui cédait les cadavres des condamnés exécutés et retardait même parfois les exécutions en fonction des besoins de l'anatomiste. Au cours de ses nombreuses dissections, Vésale s'aperçut que les traités anatomiques de Galien étaient peu fiables et qu'ils représentaient le plus souvent l'anatomie d'un macaque et non celle d'un humain ! Vésale défia ouvertement la tradition galénique en 1539.

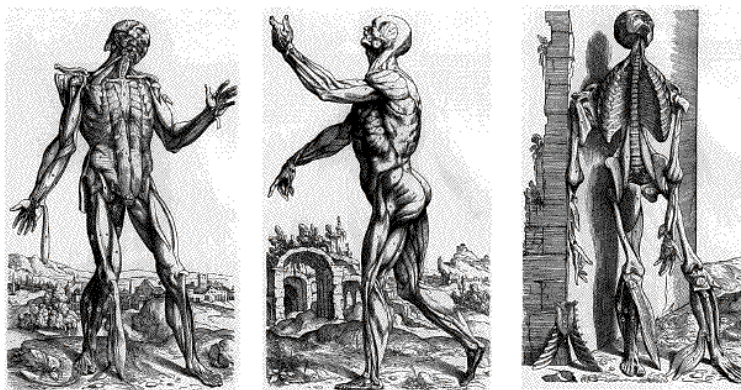


FIG. 11.1: Illustrations tirées de la *Fabrica* de Vésale.

En 1543 parut son ouvrage capital¹ : *De Humani corporis fabrica* (de la fabrique du corps humain). Pour la réalisation de cet ouvrage, Vésale chercha le concours des meilleurs graveurs sur bois de son époque, afin

¹Fait significatif : la même année que celui de Copernic.

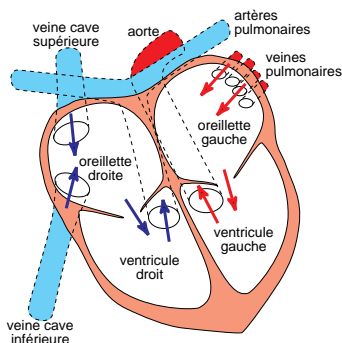
de reproduire les détails anatomiques le plus naturellement et le plus fidèlement possible. Cet ouvrage est en fait autant une oeuvre d'art qu'une oeuvre scientifique capitale.

La *fabrica* de Vésale suscita de nombreuses critiques en provenance des milieux académiques, qui ne pouvaient facilement accepter la profonde remise en question qu'elle provoquait. Vésale, en partie pour ne pas avoir à supporter toutes ces critiques, en partie pour augmenter ses revenus, retourna à la pratique de la médecine à la cour impériale d'Allemagne.

Vésale eut de brillants successeurs, dont Gabriel FALLOPPE (1523/1562), connu pour son étude du système reproducteur et du développement du fœtus. Il étudia également des structures aussi fines que l'oreille interne. Fallope fut peut-être un observateur encore plus précis que Vésale. Il publia ses *Observationes anatomicæ* en 1561. Signalons aussi l'Allemand Volcher COITER (1534/1576), qui pratiqua de nombreuses dissections sur des humains et des animaux, ainsi que des vivisections sur des animaux ; ses travaux furent aussi magnifiquement illustrés. Coiter fut un pionnier de l'étude comparative de l'anatomie de plusieurs espèces (anatomie comparée). L'anatomie comparée allait progressivement démontrer que l'espèce humaine comporte des liens de parenté étroits avec plusieurs espèces animales, mais il fallut attendre Darwin pour que le statut particulier de l'être humain dans la création fut complètement remis en question.

Fait à noter : il n'y a pas, à cette époque, de distinction entre médecin et biologiste ou naturaliste. En fait, beaucoup de scientifiques de cette époque avaient une formation médicale, même ceux surtout célèbres pour leurs contributions aux sciences physiques² (on pense à W. Gilbert, par exemple).

Ainsi, le XVI^e siècle est marqué par une refonte de nos conceptions sur le corps humain autant que sur le système solaire, refonte qui repose sur l'esprit d'observation et d'innovation et sur une cassure avec la tradition scolastique.



(11.1)

Harvey et la circulation du sang L'un des problèmes les plus importants de la physiologie après Vésale était de comprendre la fonction du cœur, sachant que les idées de Galien à ce sujet étaient fausses. La solution à ce problème fut apportée par l'Anglais William HARVEY (1578/1657), dans son ouvrage *De motu cordis* (sur le mouvement du cœur), paru en 1628, mais résultant de découvertes effectuées dès 1616. Cet ouvrage est un chef-d'œuvre de sobriété scientifique, basé sur l'observation et l'analyse seules, sans invocation de principes métaphysiques. Harvey observa l'action du cœur chez plusieurs espèces animales. L'observation des animaux à sang froid, ou cette action peut être ralentie par une température plus basse, lui permit de la considérer en temps réel, en particulier d'observer que la pulsation de l'aorte est une conséquence de celle du ventricule gauche, et que toutes les parties du cœur ne se contractent pas en même temps. Harvey en conclut que le cœur agit comme une pompe et que l'action des valves du cœur mène inéluctablement au scénario suivant : le sang de la veine cave s'introduit dans l'oreillette droite, d'où il est poussé vers le ventricule droit qui, en se contractant, le pousse vers les poumons à travers les artères pulmonaires. Le sang veineux, aéré dans les poumons, revient à l'oreillette gauche par les veines pulmonaires et ensuite dans le ventricule gauche, d'où il est poussé dans l'aorte. Il n'y a donc pas de mouvement de

²L'ancien sens du mot *physicien* englobait tous ceux qui s'occupaient de sciences de la nature, y compris les médecins. D'ailleurs, l'anglais utilise encore *physician* pour *médecin*, alors que le terme *physicist* a été introduit pour distinguer ceux qu'on appelle aujourd'hui les physiciens.

va-et-vient, mais une circulation unidirectionnelle du sang. Le sang doit effectuer un cycle complet avant de revenir au coeur. La seule partie de ce cycle qui manquait aux yeux de Harvey, qui ne disposait pas, à son époque, de microscope, était le jeu des vaisseaux capillaires, où le sang artériel, ayant livré la marchandise (l'oxygène) retourne dans les veines. Harvey utilisa aussi des arguments quantitatifs en faveur de la circulation du sang : il estima que le coeur contient environ 60 g de sang. À 72 battements par minutes, le ventricule gauche doit donc refouler environ 250 kg de sang par heure dans l'aorte. Il est clair que le foie ne peut produire une telle quantité de sang et donc que c'est le même sang qui revient au coeur. D'autre part, Harvey se souvint des leçons de son maître (Fabricius) qui avait clairement démontré que les valvules des veines ne laissent passer le sang que dans un sens.

Notons que Harvey avait eu des précurseurs au XVI^e siècle : premièrement l'Espagnol Michel SERVET, qui avait découvert la petite circulation du sang (entre le coeur et les poumons). Deuxièmement, l'Italien CESALPINO (ou CÉSALPIN, plus connu comme le fondateur de la botanique moderne, digne successeur de Théophraste). Cesalpino avait défendu l'idée de la circulation unidirectionnelle du sang, mais sans apporter des preuves et des observations aussi convaincantes que Harvey. A partir de la théorie de Harvey sur la circulation du sang, rapidement acceptée, on abandonna progressivement toute référence aux "esprits" d'Empédocle et de Galien pour les remplacer par une action purement mécanique. Après tout, le XVII^e siècle, avec Descartes, est le siècle de la mécanique, où on en vint à conclure que les être vivants n'étaient que des automates sophistiqués.

11.2 La microscopie

De même que la lunette et le télescope ont permis de multiplier les sens de l'être humain vers les objets éloignés, la mise au point du microscope a permis de sonder le monde vivant comme jamais il ne l'avait été. Les premiers prototypes de microscopes remontent à aussi loin que 1615. Cependant, le premier microscope vraiment utilisable fut construit par Robert Hooke vers 1660. Son instrument était couplé à une source d'éclairage concentré par une lentille et n'offrait qu'un agrandissement modeste (quelques dizaines de fois). Hooke l'utilisa pour étudier le monde des insectes et des végétaux et publia en 1665 un recueil abondamment illustré de ses observations : la *Micrographia*. En observant un morceau d'écorce au microscope, Hooke découvrit que le bois était en fait formé d'une multitude de cavités rectangulaires contigües, évoquant les cellules d'un monastère. En fait, Hooke observait les restes des parois cellulaires du bois, vidées de leur matière vivante. Le mot *cellule* est resté pour désigner l'unité fondamentale du vivant, mais presque deux siècles allaient s'écouler avant qu'on établisse la théorie cellulaire proprement dite.

À la même époque que Hooke, le Hollandais Antony van LEEUWENHOEK (1632/1723) construisit aussi un microscope, d'un principe différent : une minuscule bille de verre, placée sur un trou d'épingle pratiqué sur une surface de cuivre, faisait office de lentille et l'échantillon à observer était fixé sur une épingle de l'autre côté de la plaque. Malgré la simplicité de ce dispositif, Leeuwenhoek parvint à des agrandissements de 270×. Il put ainsi observer pour la première fois les globules rouges du sang, des bactéries provenant du tartre des dents, des spermatozoïdes (aussi appelés *animalcules* à l'époque), etc. Il observa aussi la parthénogenèse des pucerons (reproduction par clonage, en l'absence de mâle). Pour sa part, Christian Huygens, spécialiste des instruments d'optique, observa des protozoaires³ dès 1678.

Les premiers microscopes souffrent cependant des mêmes maux que les premières lunettes astronomiques : l'aberration chromatique, en plus de la mauvaise qualité du verre de l'époque. Il faut attendre les travaux de l'opticien Giovanni Battista AMICI (1786/1863) pour que les aberrations soient corrigées (1827) et qu'un microscope plus puissant soit disponible. Dès lors, les progrès sont plus rapides. Le botaniste allemand Mathias SCHLEIDEN (1804/1881) découvre en 1837 que les plantes sont entièrement formées d'unités qu'il appelle *cellules*, d'après Hooke. Deux ans plus tard, son collègue zoologiste Theodor SCHWANN (1810/1882) arrive à la même conclusion en observant des tissus animaux. La *théorie cellulaire*, selon laquelle la cellule est l'"atome du vivant", l'unité de base, s'établit surtout avec les travaux de Rudolf VIRCHOW (1821/1902),

³Un *protozoaire* est un être unicellulaire eucaryote (c'est-à-dire avec noyau) de type animal : il ne pratique pas la photosynthèse et se nourrit en absorbant les éléments nutritifs de son voisinage. L'amibe en est un exemple.

qui affirme que toute cellule provient d'une autre cellule (*omnis cellula e cellula*).

La microscopie optique atteint cependant rapidement ses limites, car l'agrandissement possible est limité par la diffraction de la lumière : on ne peut distinguer les détails qui ne sont séparés que par une distance de l'ordre de la longueur d'onde de la lumière visible, à savoir une fraction de micron. La situation change après 1945, avec la mise au point du *microscope électronique*. Cet appareil, rendu concevable depuis les progrès de la physique quantique, repose sur le principe que l'électron a aussi les propriétés d'une onde et que la longueur d'onde d'un faisceau d'électrons peut être ajustée à des valeurs arbitrairement petites en augmentant l'énergie des électrons. La maîtrise de cet instrument par les biologistes a demandé un effort considérable car l'échantillon doit être minutieusement préparé en couches extrêmement minces (les électrons sont peu pénétrants). La microscopie électronique a cependant révélé des détails auparavant soupçonnés et a permis d'étudier en détail la morphologie interne des cellules. La biologie, en particulier la microbiologie, est extrêmement dépendante du perfectionnement des instruments d'observation, comme l'astronomie d'ailleurs. Contrairement à la physique, qui ne peut compter que sur elle-même pour avancer, les facteurs de progrès de la biologie sont non seulement internes, mais aussi externes à cette science. Les progrès de la physique et de la chimie ont amené des progrès rapides en biologie que les efforts des seuls biologistes n'aurait pu réaliser.⁴

11.3 La controverse sur la génération

Parmi les grandes questions qui ont occupé les scientifiques et les philosophes au cours des siècles, l'une des plus importantes, peut-être la plus importante de toutes, est celle de l'origine de la vie. En dépit des rapides progrès de la biologie au cours des dernières décennies, cette question reste encore sans réponse sur le fond, même si un grand nombre de "mécanismes vitaux" ont été élucidés.

11.3.1 Anciennes conceptions de la génération

La génération spontanée Dès le départ, deux idées s'affrontent quant à l'origine de la vie : D'une part, selon les tenants de la *génération spontanée*, la vie peut apparaître spontanément à partir de la matière inerte. Comme il est évident que les animaux supérieurs n'apparaissent que par reproduction à partir d'autres être vivants, l'hypothèse de la génération spontanée n'est appliquée qu'aux animaux inférieurs : vers, insectes et vermine. Jusqu'au XVII^e siècle, il était généralement admis que les anguilles, les souris et les rats pouvaient être générés spontanément à partir de la boue ; les puces et les poux à partir de la sueur ; les mouches à partir de la viande en putréfaction, etc. Ceci ne contredisait pas l'existence de reproduction sexuée chez ces mêmes animaux, car la génération spontanée ne faisait apparaître que l'"oeuf initial", en quelque sorte, les animaux ainsi créés pouvant se reproduire d'eux-mêmes par la suite. Aristote croyait effectivement que certains animaux et végétaux inférieurs peuvent apparaître spontanément à partir de la terre et de l'eau, sans besoin d'une semence.

Au XVII^e siècle, des doutes croissants, à caractère philosophique ou religieux, commencent à émerger. On se demande comment un être vivant, chose si complexe, peut apparaître sans intervention divine. S'oppose donc à la génération spontanée la thèse du *omne vivum ex vivo* selon laquelle tout être vivant provient d'un autre être vivant et est ultimement créé par Dieu. À l'appui du *omne vivum ex vivo*, l'Italien Francesco REDI (1626/1697) procède à une expérience sur la putréfaction des viandes :⁵ il dispose dans deux fioles une quantité de viande et bouche l'une des fioles à l'aide d'une gaze ou d'une feuille de papier, alors que l'autre fiole reste ouverte. Il observe que la viande de la fiole ouverte est infestée de vers quelques jours après, alors que la viande de l'autre fiole reste libre de vers, même plusieurs mois après. Il en conclut que les vers ne sont pas apparus spontanément, mais ont été pondus par des insectes qui se sont introduits dans la fiole entretemps.

⁴Il y a bien sûr des exceptions à cette règle. Darwin n'avait besoin que de son imagination et de son sens de l'observation. L'histoire naturelle en général est moins tributaire de l'instrumentation physico-chimique. Mais la biologie moléculaire est dans la situation opposée.

⁵*Esperienze intorno alla generazione degli insetti*, 1668.

Par contre, le XVIII^e siècle, avec sa vision plus mécanique de l'Univers inspirée de Descartes et de Newton, redonne à la génération spontanée ses lettres de noblesse, nonobstant les expériences de Redi. À partir de ce moment, il est clair que la bataille de la génération spontanée n'est pas seulement scientifique, mais aussi religieuse : les tenants de la génération spontanée sont réputés être athés et matérialistes, alors que leurs adversaires tiennent mordicus au rôle divin dans l'origine de la vie. Nous verrons plus loin comment, à la suite des travaux de Pasteur, la communauté scientifique a rejeté la génération spontanée, mêmes pour les êtres les plus simples (les microbes), du moins dans les conditions actuelles de l'environnement terrestre.

Préformation contre épigénèse Une autre question relative à l'origine de la vie se pose très tôt dans l'histoire, cette fois pour les animaux supérieurs, pour lesquels la génération spontanée est évidemment impossible. Dès l'Antiquité, les idées du médecin HIPPOCRATE s'opposent à celle d'Aristote. Le premier croit qu'un animal (l'être humain en particulier) se développe au sein de sa mère à partir d'un germe préformé, qui contient déjà toutes les parties de l'adulte. Le développement de l'embryon n'est en sorte qu'un grossissement progressif. C'est la thèse de la *préformation*. Quant à Aristote, il croit plutôt que le sperme du mâle est homogène, quoiqu'il porte en lui-même la potentialité de tous les organes ; la femelle, elle, ne fournit que la matière nourricière nécessaire au développement. C'est la thèse de l'*épigénèse* : les organes, les membres, etc., apparaissent peu à peu au cours de la croissance de l'embryon, mais ne sont pas présent sous une forme microscopique dans la semence.

L'idée de préformation redevient populaire au XVIII^e siècle. Elle semble raisonnable, puisqu'on retrouve chez certaines plantes une sorte de "germe" ou "pousse" préformée qui n'attend que l'année suivante pour éclore et s'épanouir. Les partisans de la préformation animale se divisaient en deux camps : certains croyaient que le germe préformé était contenu dans l'ovule et étaient conséquemment surnommés *ovistes*, alors que d'autres croyaient que le germe résidait dans le spermatozoïde (découvert par Leeuwenhoek) et étaient surnommés *spermatistes* ou *animalculistes*. La réalité, plus complexe, de l'union de gamètes mâle et femelle était loin d'être soupçonnée. Notons que c'est à cette époque (1694) que l'Allemand Rudolf Jakob CAMERARIUS (1665/1721) découvre la sexualité des plantes, en amputant les étamines chez les plantes hermaphrodites et en séparant les sexes chez les plantes sexuées.

Une autre controverse divise les naturalistes de cette époque, essentiellement parmi les adeptes de la préformation : la question de l'origine des germes. Certains croient en la *dissémination* des germes, c'est-à-dire que la Nature fourmille littéralement de germes de vie, datant de la création. Selon les spermatistes, un germe peut être capturé par le mâle, qui lui donne alors une sorte de signal de développement, avant de l'introduire dans la femelle. Selon les ovistes, c'est plutôt la femelle qui peut capturer un germe alors que le rôle du mâle se limite à initier le développement du germe. À l'opposée de la dissémination se situe la thèse de l'*emboîtement*, de Jan SWAMMERDAM (1637/1680) : chaque germe doit aussi contenir en lui-même les germes de toutes les générations futures, sinon la vie ne peut se perpétuer plus qu'une génération. Ainsi, toute l'humanité actuelle devait être contenue dans le corps d'Eve (selon les ovistes) ou d'Adam (selon les spermatistes), sous forme de germes emboîtés les uns dans les autres comme des poupées russes. La fin du monde, ou de l'humanité, se produit lorsque les stocks sont épuisés : l'"apocalypse par rupture de stock", en quelque sorte. L'absurdité de cette hypothèse apparaît peu à peu : En 1722, Hartsoecker calcule que le rapport de taille entre un grain de blé parvenu à maturité et le germe correspondant au moment de la Création (moins de 6000 ans auparavant, selon la Bible) serait de 10^{30} et il ne peut concevoir, avec raison, un être vivant aussi minuscule ! Il faut cependant garder à l'esprit que la découverte des animalcules et autres animaux unicellulaires à la fin du XVII^e siècle ont laissé croire à certains que des structures complexes et vivantes arbitrairement petites pouvaient exister. C'était avant la théorie cellulaire et la théorie atomique. Signalons que les oppositions entre spermatistes et ovistes et entre dissémination et emboîtement sont indépendantes, ce qui divise le monde des naturalistes de l'époque en quatre camps, sans compter les partisans de l'épigénèse et de la génération spontanée !

11.3.2 L'oeuvre de Pasteur

La génération spontanée au XIX^e siècle Les thèses épigénétiques reprennent progressivement le dessus sur la préformation au XVIII^e siècle. Notons que les épigénétistes croient généralement en la possibilité de

génération spontanée des animaux inférieurs. Au début du XIX^e siècle, cette dernière thèse est diversement acceptée ou rejetée selon les pays. En France, Lamarck reconnaît la possibilité d'une génération spontanée pour les infusoires (protozoaires vivant dans les liquides) et les vers parasites. Il suppose l'existence d'une force vitale, sous l'action de laquelle ces organismes vivants apparaissent à partir de la matière inerte, et d'une force de décomposition, responsable de la putréfaction des organismes morts. Cependant, les idées de Lamarck sont généralement mal reçues dans la période post-napoléonienne : le retour à la tradition religieuse en France s'accorde mieux avec le catastrophisme de Cuvier et le rejet de la génération spontanée. Par contre, on peut affirmer que la génération spontanée est favorablement envisagée par la majorité des biologistes allemands de cette période. En Angleterre, la question est plutôt passée sous silence, Darwin lui-même affirmant que la question est trop hors de portée de la science positive pour être abordée. Il écrit en 1859 que de chercher l'origine de la vie est une perte de temps (*a waste of time*). Mais comme il est curieux de parler d'évolution sans évoquer les conditions initiales de cette évolution, Darwin supposera, en 1872, que Dieu a créé la vie sous quelques formes simples et que l'évolution a fait le reste.

Louis Pasteur Louis PASTEUR (1822/1895) était le fils d'un tanneur et poursuit une formation de chimiste. Il fut professeur de chimie à l'Université de Strasbourg, puis de Lille, puis enfin à l'École Normale Supérieure de Paris, ainsi qu'à la Sorbonne. Après 1888, il fut directeur de l'institut qui porte son nom et qui encore aujourd'hui est un joueur majeur en microbiologie.

Les premiers travaux de Pasteur, comme mentionné en section 7.4.2, ont porté sur la disymétrie (ou chiralité) des substances organiques synthétisées par les êtres vivants. Ces travaux l'ont conduit à penser que la vie ne peut pas être expliquée uniquement par les lois microscopiques de la physique et de la chimie. Pasteur restera donc toute sa vie un vitaliste et par conséquent opposé à l'idée de génération spontanée. Nous savons maintenant que la synthèse asymétrique est possible en laboratoire et que l'impossibilité de cette synthèse ne peut donc être en soi une raison de croire au vitalisme.

Le problème de la fermentation À partir de 1854, quand Pasteur arrive à Lille, des producteurs de bettraves lui demandent de réfléchir au problème de la fermentation alcoolique. Faisons ici un petit rappel des théories de l'époque concernant le processus de fermentation. En 1836, Theodor Schwann procède à une expérience au cours de laquelle il fait bouillir de la viande dans deux contenants dont l'air s'échappe sous la pression d'ébullition. Ensuite, Schwann réintroduit l'air atmosphérique dans les deux contenants, à travers un tube chauffé à blanc dans un cas (flacon A) et directement dans l'autre (flacon B). Les deux contenants sont ensuite scellés. Schwann constate au bout de quelques temps que la putréfaction est avancée dans le flacon B alors qu'elle n'a pas commencé dans le flacon A. Il en conclut qu'un "agent" transporté par l'atmosphère est nécessaire à la putréfaction, mais que cet agent est éliminé par la chaleur. La même année, le Français Charles CAGNIARD DE LATOUR (1777/1859) affirme que la levure est composée d'organismes vivants, qui causent la fermentation aussi longtemps qu'ils vivent et qu'il disposent de sucre. Or, les chimistes de l'époque (Berzélius, Wöhler, Liebig) sont tous d'accord, malgré leurs divergences, pour affirmer que la fermentation est un processus purement chimique qui ne fait pas intervenir des êtres vivants.

Pasteur étudie premièrement la fermentation lactique, au cours de laquelle les hydrates de carbone du lait sont transformés en acide lactique et en alcool amylique (pentanol). Il découvre que les produits de la fermentation sont chiraux et que par conséquent le processus est l'oeuvre d'êtres vivants. Poursuivant donc l'oeuvre de Cagniard de Latour, Pasteur distingue les processus *aérobies* et *anaérobies* : les micro-organismes impliqués dans la fermentation ont besoin d'oxygène ; s'ils ont accès à l'oxygène de l'atmosphère, ils se multiplient sans produire d'alcool (processus aérobie). Cependant, s'ils sont coupés de l'atmosphère, ils peuvent extraire l'oxygène des sucres environnants, les transformant ainsi en alcool (processus anaérobie). Pasteur explique donc pourquoi la production d'alcool requiert que les contenants soient hermétiquement fermés.⁶ Pasteur découvre même qu'il existe un type de bactérie essentiellement anaérobie, qui meurt en présence d'oxygène.⁷

⁶Si la fermentation anaérobie continue trop longtemps, le taux d'alcool de la solution devient trop élevé et tue les micro-organismes impliqués. Il faut alors procéder par distillation si on désire obtenir un produit plus alcoolisé. Les hydrocarbures demeurent une composante essentielle de toute production d'alcool et chaque source potentielle de sucre ou d'amidon est associée à un type de boisson alcoolisée qui lui est propre : le fruit de la vigne donne le vin, le miel donne l'hydromel, la canne à sucre donne le rhum, diverses sortes de grain (orge, froment, etc.) donnent la bière, le whiskey, la vodka, etc.

⁷Cette découverte prend toute son importance dans le contexte de l'apparition de la vie sur Terre, avant que l'oxygène ait été

La génération spontanée et la fermentation C'est une chose de démontrer que la fermentation est causée par des micro-organismes et c'en est une autre de déterminer si ces micro-organismes sont apparus spontanément dans la solution ou ont été véhiculés par l'air ambiant ou par tout autre vecteur. La controverse à ce sujet entre Pasteur et F.A. POUCHET (1800/1872) va alimenter pendant plusieurs années la chronique scientifique et mérite d'être relatée.

Pasteur démontre que les germes responsables de la fermentation sont véhiculés par l'air en aménageant des flacons remplis d'eau sucrée, stérilisés au préalable, dont l'air a été chassé par ébullition et dont les orifices ont été fermés hermétiquement par travail du verre. Aucune fermentation n'apparaît dans ces flacons. Si l'air atmosphérique est réintroduit dans un de ces flacons, la fermentation se produit (c'est l'expérience de Schwann que Pasteur répète ici). Mieux encore, Pasteur filtre l'air atmosphérique à travers des tampons d'ouate, lave ceux-ci à l'alcool et recueille le filtrat qu'il examine au microscope : il y observe quantité de germes (protozoaires ou bactéries). Si ces germes sont manuellement introduits dans les flacons stériles contenant de l'eau sucrée, ou un bouillon de culture propice, ils se multiplient rapidement. Pasteur procède même à une étude du degré de contamination de l'air ambiant par les germes en introduisant brièvement de l'air atmosphérique dans une dizaine de flacons dans la cour de son laboratoire ; il découvre que 8 flacons sur dix ont vu les germes se multiplier alors que les deux autres sont restés stériles. En répétant la même expérience dans le sous-sol, il constate que moins de flacons sont contaminés. Plus tard, au cours d'un voyage dans les Alpes et le Jura, il répète cette expérience à trois altitudes différentes et constate que la densité de germes diminue rapidement avec l'altitude. Bref, Pasteur découvre la *panspermie* de l'atmosphère : l'air ambiant est rempli de germes de toutes sortes et les maladies infectieuses peuvent très bien se transmettre simplement par la voie des airs.

Les travaux de Pouchet Parallèlement aux travaux de Pasteur, Pouchet réalise des expériences sur la fermentation du foin, causée par le bacille du foin (*Bacillus subtilis*). Ses conclusions sont opposées à celles de Pasteur : même après avoir soumis ses échantillons à une ébullition prolongée et scellé hermétiquement ses flacons, il constate que la vie s'y développe quand même. Pour trancher une fois pour toute la question de la génération spontanée, l'Académie des sciences lance un concours sur ce sujet en 1860. Le mémoire de Pasteur, *Sur les corpuscules organisés qui existent dans l'atmosphère*, soumis en 1862, est couronné par l'Académie. Pouchet, quant à lui, retire son mémoire, persuadé, avec raison, que le jury de l'Académie entretient des préjugés à son endroit. Curieusement, même si Pouchet est partisan du catastrophisme de Cuvier et croit qu'une force vitale est nécessaire pour que la matière inerte se forme en un micro-organisme vivant, il passe aux yeux du public comme un matérialiste athée en raison de son adhésion à la génération spontanée. Au même moment, les idées de Darwin, également impies, commencent à être discutées en France et le monde scientifique se divise en deux camps : les croyants pour Pasteur et les darwinistes pour Pouchet. Cette polarisation ridicule ne fait qu'obscurcir le débat.

Les travaux de Pouchet ne sont simplement pas pris au sérieux. En fait, le malheur de Pouchet est d'avoir travaillé sur le bacille du foin. En 1875, l'Allemand Ferdinand COHN⁸ démontre que ce bacille est extrêmement résistant et peut survivre à une ébullition prolongée, ce qui explique les résultats de Pouchet. Dans cette histoire, Pasteur et Pouchet doivent tous les deux porter un certain blâme : Pouchet, pour avoir refusé de répéter ses expériences avec les dispositifs élaborés par Pasteur ; Pasteur, pour avoir refusé d'expérimenter sur la fermentation du foin. Le manque de dialogue effectif entre les deux parties, alimenté par la polarisation déplorable de l'opinion, a causé une controverse scientifique qui aurait pu être évitée.

Nous passerons sous silence ici les travaux ultérieurs de Pasteur sur la vaccination, travaux qui ont mené à la fondation de l'institut Pasteur. Insistons toutefois sur le fait que Pasteur est à l'origine d'une prise de conscience universelle sur l'importance de l'hygiène – prise de conscience qui a peut-être connu des excès dans certains foyers – et de plusieurs procédés de stérilisation (pasteurisation) et qu'il a effectivement bien mérité la reconnaissance publique universelle dont il a été l'objet vers la fin de sa vie.

répandu dans l'atmosphère.

⁸C'est Cohn qui, en 1872, introduit le mot *bactérie* (*Bakterie*, en allemand).

11.4 La génétique

La génétique est l'étude de la transmission héréditaire des caractères. Rappelons qu'un *caractère* est une propriété visible d'un individu (couleur des yeux, des cheveux, etc.), qu'on associe aujourd'hui à un *gène* bien déterminé. Nous verrons ici brièvement comment ces concepts se sont développés. Une condition préalable à l'essor de la génétique au XXe siècle a été l'abandon de l'idée d'hérédité des caractères acquis, proposée par Lamarck et acceptée même par Darwin. Une fois cette idée mise de côté, tous les caractères sont considérés comme hérités des parents et l'étude des caractères sur plusieurs générations peut nous apprendre quelque chose d'important, si cette étude est menée de manière systématique et honnête, bref, de manière scientifique. C'est ce qu'accomplit Mendel.

11.4.1 Mendel

Gregor Mendel (1822/1884) était moine au monastère des Augustins de Brno, aujourd'hui en république tchèque, à l'époque partie de l'empire austro-hongrois. De 1855 à 1864, il mena des expériences sur les croisements de quelques races de pois et énonça des règles empiriques régissant la transmission des caractères sur plusieurs générations, connues aujourd'hui comme les lois de Mendel. Celui-ci n'est certes pas le premier à réaliser des expériences d'hybridation sur les plantes, mais il est le premier à dégager des règles simples sur la transmission des caractères, et ce en raison de la patience et de la diligence dont il fit preuve tout au long de ses expériences. En plus du soin qu'il apporta à son travail, le succès de Mendel peut être attribué aux facteurs suivants :

1. Mendel compte tous les individus issus de ses croisements, pour accumuler des statistiques : il fait de la botanique quantitative et se met ainsi à l'abri d'impressions biaisées que la seule observation qualitative pourrait causer. Au total, Mendel examinera environ 12 000 plants différents.
2. Mendel choisit une espèce (les pois) au nombre limité de descendants (plante monosperme). Autrement, le dénombrement des individus aurait été pratiquement impossible. D'autre part, le pois se prête bien au contrôle de la reproduction (isolement du pollen étranger, suppression de l'autofécondation, etc.).
3. Alors que certains de ses prédécesseurs moins heureux se sont perdus dans la complexité des combinaisons de multiples caractères, Mendel choisit un nombre limité de caractères visibles facilement identifiables.

Mendel isola 22 races "pures" de pois ayant des caractères visibles bien définis et toujours reproduits d'une génération à l'autre. Ces caractères étaient :

1. L'apparence lisse ou plissée des graines.
2. La couleur (jaune ou verte) des cotylédons.
3. La couleur (blanche ou grise) des enveloppes.
4. La forme (droite ou courbée) des gousses.
5. La couleur (jaune ou verte) des gousses non mûres.
6. La position des fleurs sur la tige : axiale (le long de la tige) ou terminale (à l'extrémité de la tige)
7. La longueur de la tige : longue (1,80–2,00m) ou courte (0,22–0,50m).

Mendel procéda ensuite à des hybridations, en fécondant lui-même des individus d'une race à l'aide de pollen issu d'autres races et en coupant les étamines pour empêcher toute fécondation supplémentaire non contrôlée. Il examina ensuite les caractères des descendants et en déduisit ce qu'on désigne habituellement comme les trois lois de Mendel :

1. la première génération (F_1) adopte intégralement l'un des caractères des parents, caractère dès lors appelé *dominant* ; l'autre caractère est appelé *récessif*.
2. En interfécondant les individus de la première génération, on obtient une deuxième génération (F_2) dont le quart des individus possèdent le caractère récessif et les trois quarts le caractère dominant.

3. Les deux premières lois s'appliquent indépendamment à des caractères différents, sans interférence. Par exemple, le croisement d'une race à graine lisse et à enveloppe grise avec une race à graine ridée et enveloppe blanche produit des individus à enveloppe blanche et graine ridée en une proportion de $\frac{1}{4} \times \frac{1}{4} = \frac{1}{16}$, des individus à enveloppe grise et graine ridée en une proportion de $\frac{3}{4} \times \frac{1}{4} = \frac{3}{16}$, etc. Notons que cette troisième loi n'est pas aussi exacte que les deux premières et sera plus tard remise en question.

TAB. 11.1: Résultats des croisements effectués par Mendel.

Caractères opposés des parents	Caractère observé en F_1	Caractères observés en F_2	Rapport
Forme des graines : lisse ou ridée	graines lisses	5474 graines lisses 1850 graines ridées	2,96 :1
Couleur des cotylédons :jaune ou verte	cotylédons jaunes	6022 cotylédons jaunes 2001 cotylédons verts	3,01 :1
Couleur de l'enveloppe des graines : blanche ou grise	enveloppes grises	705 enveloppes grise 224 enveloppes blanches	3,15 :1
Forme des gousses : rectiligne ou irrégulière	gousses rectilignes	776 gousses rectilignes 229 gousses irrégulières	2,95 :1
Couleur de la gousse non mûre : verte ou jaune	gousses vertes	428 gousses vertes 152 gousses jaunes	2,82 :1
Position des fleurs : axiale ou terminale	fleurs axiales	651 fleurs axiales 207 fleurs terminales	3,14 :1
Longueur des tiges : longue ou courte	tiges longues	787 tiges longues 277 tiges courtes	2,84 :1

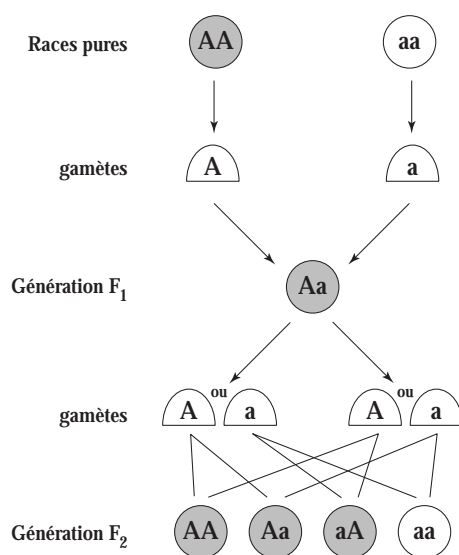


FIG. 11.2: Schéma explicatif des deux premières lois de Mendel. Le phénotype dominant apparaît en gris.

Le fait capital qui ressort des lois de Mendel est qu'un caractère récessif, absent du phénotype de la première génération (F_1), peut réapparaître dans la deuxième génération (F_2). De ce fait, Mendel conclut que chaque plant possède *deux* unités (ou gènes) héréditaires, que ces gènes sont séparés lors de la formation des cellules sexuelles (gamètes) et qu'un individu de la génération suivante est le fruit de la combinaison

de deux gamètes, une provenant de chaque parent. Ainsi, si on note par A le gène d'un caractère dominant et par a celui du caractère récessif correspondant, les individus des races pures initiales portent les gènes AA et aa. Les individus de la première génération hybrides portent tous les gènes paires Aa et affichent tous le caractère dominant. Enfin, la deuxième génération, obtenue en interfécondant les membres de la première génération hybride, se divise en quatre groupes, portant respectivement les paires AA, Aa, aA et aa, ce qui explique que le caractère dominant se retrouve trois fois sur quatre et le caractère récessif une fois sur quatre (voir la figure 11.4.1).⁹

Le travail de Mendel est publié en 1865 dans une revue locale peu diffusée dans d'autres pays.¹⁰ Une copie de son mémoire est tout de même envoyée à environ 120 académies et sociétés savantes du monde entier, mais l'impact est presque nul. Ses travaux sombrent dans l'oubli. En 1900, ses lois de l'hérédité sont redécouvertes indépendamment par trois biologistes : Hugo DE VRIES, K. CORRENS et E. VON TSCHERNAK. De Vries découvre le mémoire de Mendel après être arrivé aux mêmes conclusions et lui attribue la paternité des lois de la génétique dans son mémoire, 16 ans après la mort de Mendel. Les travaux de celui-ci sont alors diffusés et reconnus par la communauté scientifique. En 1906, l'Anglais W. BATESON introduit le mot *génétique* pour désigner justement l'étude de la transmission des caractères.

11.4.2 La localisation des gènes

Soulignons que, pour Mendel comme pour ses redécouvreurs, la notion de gène est abstraite et ne correspond à aucun objet physique identifié. On imagine seulement que "quelque chose" est transmis d'une génération à l'autre, sans savoir en quoi cela consiste précisément. Le début du XXe siècle verra rapidement se développer la théorie chromosomique de l'hérédité, selon laquelle les gènes sont localisés physiquement sur des sections précises des chromosomes, dans le noyau cellulaire.

Les chromosomes Rappelons premièrement que la théorie cellulaire, mise de l'avant par Virchow, progresse au même rythme que les techniques d'observations et de préparation au cours du XIXe siècle. La division cellulaire (mitose) est observée par Eduard STRASBURGER (1844/1912) chez les plantes et par Walter FLEMMING (1843/1915) chez les animaux. Ces observations datent de la période 1875–1884. Pour observer ce phénomène, on doit préparer des tranches très minces de tissus et ajouter des colorants qui révèlent certaines structures de la cellule sans trop affecter leurs fonctions. Ainsi, une structure en forme de bâtonnets apparaît dans le noyau cellulaire avant la division. Parce qu'ils sont fortement imprégnés de colorant, on appelle ces bâtonnets *chromosomes*. On peut distinguer les chromosomes par leur taille et leur forme, mais toutes les cellules (sauf les cellules sexuelles) possèdent deux chromosomes de même type (chromosomes homologues). Notons, vers la même époque, qu'on observe pour la première fois la fécondation de l'ovule par le spermatozoïde. Oscar HERTWIG (1844/1922) observe ce phénomène chez l'oursin en 1875. Plus précisément, il observe le déplacement du noyau du spermatozoïde de la périphérie de l'ovule (tout juste après la fécondation) vers le noyau de l'ovule. Le noyau mâle grossit au fur et à mesure qu'il s'approche du noyau femelle et les deux se fusionnent après quelques dizaines de minutes.

En 1883, l'Allemand August WEISMAN (1834/1914) propose une théorie matérielle de l'hérédité : les chromosomes seraient faits d'éléments plus petits (les *biophores* ou *déterminants*) qui sont les gènes physiques. Ces éléments sont répliqués lors de la division cellulaire, mais seules les cellules dites *germinales* répliquent l'ensemble du patrimoine génétique (ou *plasma germinatif*), alors que les cellules *somatiques* (c'est-à-dire du corps proprement dit) ne possèdent que les éléments du plasma germinatif essentiels à leur fonction. Cette théorie de Weisman exclut toute hérédité des caractères acquis par pression de l'environnement : le développement du corps n'a aucune rétroaction sur le plasma germinatif des cellules germinales, qui est

⁹Connaissant les lois de Mendel, il est intéressant de voir comment l'obtention de races pures est possible. Le processus est simple dans le cas d'un caractère récessif, car la sélection du phénotype est alors suffisante. Le cas d'un caractère dominant est plus complexe : il faut produire plusieurs générations à partir d'une population à caractère dominant et progressivement éliminer de la reproduction tous les individus affichant le caractère récessif ; ainsi, la proportion de gènes dominant augmente constamment dans la population, sans toutefois que le gène récessif soit complètement éradiqué. On montre facilement que la proportion de gènes récessifs diminue d'un facteur deux à chaque génération, de sorte que ceux-ci sont rapidement éliminés.

¹⁰*Versuche über Pflanzen-Hybriden* (recherches sur les hybrides de plantes), société d'histoire naturelle de Brno, 1865.

intégralement transmis aux descendants.¹¹

En 1903, l'Américain Walter SUTTON (1877/1916) observe que, lors de la production des cellules sexuelles (gamètes), les chromosomes homologues se séparent, de sorte que chaque gamète ne contient qu'un chromosome de chaque type. Ce processus de division cellulaire, appelé méiose, est donc très différent de celui des cellules somatiques. Sutton fait le lien avec la théorie mendélienne de l'hérédité, qui affirme que chaque parent contribue un seul gène alors que chaque individu porte deux gènes pour un caractère donné. De là, il conclut que les gènes résident physiquement sur les chromosomes.

Les travaux de Morgan L'Américain Thomas Hunt MORGAN (1866/1945) et sa nombreuse équipe de collaborateurs mèneront une série de recherches confirmant la théorie chromosomique de l'hérédité et permettant même d'affirmer que les chromosomes sont un assemblage séquentiel de gènes.

Morgan et son équipe choisissent un matériel d'étude permettant d'obtenir rapidement plusieurs générations : la mouche du vinaigre ou *drosophile* (*drosophila melanogaster*), qui produit une nouvelle génération en deux semaines, environ. Morgan découvre en 1909 que certains facteurs (ou caractères) sont liés au chromosome sexuel (X ou Y). Il découvre aussi le phénomène de *liaison génétique* : Les gènes de la drosophile semblent approximativement se séparer en quatre groupes, dont la transmission est corrélée, en violation de la troisième loi de Mendel. Le fait que la drosophile possède quatre paires de chromosomes est manifestement la cause de ce phénomène : deux gènes résidant sur le même chromosome ont une plus grande probabilité d'être transmis ensemble lors de la méiose.

En 1911, Morgan publie sa théorie de l'enjambement (cross-over), selon laquelle les deux chromosomes homologues peuvent échanger certains de leurs segments lors de la méiose. L'enjambement multiplie les possibilités de variations génétiques, et atténue le phénomène de liaison génétique. Sans enjambement, la liaison génétique serait parfaite : un enfant hériterait des caractères de ses parents par chromosomes entiers et le nombre de combinaisons génétiques serait égal au nombre de combinaisons de chromosomes au lieu du nombre (astronomique) de combinaisons des gènes (sans compter les mutations, bien sûr). De 1910 à 1922, Morgan et son équipe parviennent à localiser précisément des centaines de gènes le long des chromosomes de la drosophile, en étudiant les différents degrés de liaison génétique. La troisième loi de Mendel, mise en défaut par la liaison génétique (en particulier chez les espèces possédant un petit nombre de chromosomes) est partiellement restaurée par la possibilité d'enjambement.

Les mutations génétiques L'un des "découvreurs" de l'oeuvre de Mendel, le Hollandais Hugo de VRIES (1848/1935), est surtout connu pour la découverte du phénomène de *mutation* génétique brusque chez les animaux et les végétaux, découverte qu'il décrit dans son ouvrage *Die Mutationstheorie* (1901-1903). La mutation est un changement dans un caractère qui apparaît soudainement, sans que ce caractère soit présent chez les générations antérieures, changement par la suite transmis aux descendants. Les mutations semblent survenir au hasard, sans répondre à une pression de l'environnement. En 1926, H.J. MULLER, l'un des collaborateurs de Morgan, démontre que l'exposition aux rayons X augmente la probabilité de mutation. On découvrira par la suite que non seulement les radiations, mais aussi certains composés chimiques peuvent provoquer des mutations. On suppose dès lors que les radiations et les autres facteurs *mutagènes* affectent l'objet physique qui supporte le gène. La plupart des mutations rendent inopérant une partie du métabolisme de la cellule.

L'une des mutations les plus étudiées de l'histoire de la génétique cause un changement de couleur des yeux de la mouche drosophile. Les généticiens américains George Wells BEADLE (1903/1989) et français Boris EPHRUSSI (1901/1979) étudièrent les effets de cette mutation en greffant sur une larve de drosophile normale le tissu oculaire d'une larve mutante ; un oeil supplémentaire se développa, mais de couleur normale, ce qui démontre que le changement de couleur n'est pas causé par le tissu oculaire lui-même, mais par le métabolisme. Des raffinements de cette expérience démontrèrent que les gènes sont en relation étroite avec les réactions chimiques au sein des êtres vivants, en particulier la production des enzymes.¹²

¹¹Notons que cette théorie, qui contient de remarquables intuitions, est incorrecte sur le plan du patrimoine génétique des cellules somatiques : on sait aujourd'hui que le code génétique est entièrement compris dans chaque cellule, mais qu'une partie seulement est exprimée, selon le type de cellule (cellule nerveuse, musculaire, hépatique, etc.).

¹²Une enzyme est une protéine agissant comme catalyseur à l'intérieur d'une cellule. Sans les enzymes, les dizaines de milliers de

Cette interprétation fut consolidée en 1941, alors que Beadle et Edward TATUM (1909/1975) étudièrent les mutations provoquées chez la moisissure *neurospora*. Cette moisissure se multiplie rapidement dans un milieu de culture minimal. Or, certaines mutations freinent ce développement, qui ne peut être débloqué que par l'addition d'un acide aminé particulier, ou d'une vitamine. De plus, ces défauts de développement sont héréditaires (*neurospora* dérive son matériel génétique de deux parents, comme les organismes supérieurs). La conclusion naturelle est que la mutation a affecté un gène responsable de la production d'une enzyme favorisant la synthèse de cet acide aminé (le développement de la colonie reprend dès que le dit acide aminé est ajouté à la main).

11.4.3 La structure de l'ADN et le code génétique

L'ADN et sa structure Morgan et ses collaborateurs découvrent que les gènes sont localisés sur les chromosomes. Ils ne savent cependant pas comment l'information génétique est codée dans le chromosome ou si ce codage est même lié à une substance particulière. Or, vers le milieu du XXe siècle, on découvre que le gène est en fait un segment de la molécule d'ADN (acide désoxyribonucléique, DNA en anglais) et que cette molécule a une structure particulière (la double hélice) qui lui permet de se dupliquer facilement. Cette découverte capitale marque un tournant dans l'histoire de la biologie microscopique, que nous allons brièvement relater ici.

En 1869, Friedrich MIESCHER isole la substance chimique dont est principalement constitué le noyau et l'appelle *nucléine*. Plus tard, on distinguera des variétés chimiques de cette substance : l'acide désoxyribonucléique (ADN) et l'acide ribonucléique (ARN), sans toutefois en connaître les fonctions : l'analyse chimique est dans ce cas purement compositionnelle.

C'est en 1944 seulement que Oswald T. AVERY, C. MACLOED et M. MCCARTY concluent que c'est l'ADN qui porte les gènes, à l'aide d'expériences réalisées sur *Streptococcus pneumoniae*. Cette bactérie existe en deux variétés : (i) la lisse (L), qui cause principalement la maladie et dont les individus s'agglomèrent en colonies d'apparence lisse et (ii) la rugueuse (R), moins virulente et dont les colonies sont moins bien agglomérées. L'une des expériences qui mènent à cette conclusion avait déjà été réalisée en 1926 par le généticien britannique Fred GRIFFITHS : il avait injecté à des souris une culture de bactéries de type R mélangées à des bactéries de type L, mais pathogènes cette fois, et tuées au préalable par la chaleur. Or, ce cocktail provoqua une infection mortelle chez les souris. Avery et ses collaborateurs, dans un raffinement de cette expérience, réussirent à extraire l'ADN de colonies de type L et à l'ajouter à une culture de type R. On s'aperçut que la culture de type R contenait par la suite des colonies de type L, même si aucune bactérie vivante de type L n'y avait été introduite. On en déduisit que l'ADN des bactéries de type L avait été récupéré par les bactéries de type R et qu'elles avaient développé le caractère lisse et pathogène de l'autre type de bactérie. Ce transfert d'ADN peut s'effectuer par l'intermédiaire d'un virus.

Une expérience plus décisive eut lieu en 1952. Les biologistes américains Alfred HERSHEY et Martha CHASE procédèrent au marquage d'un virion – la partie infectieuse d'un virus, formée d'ADN recouverte de protéines – par un isotope radioactif. Il est possible de marquer soit l'enveloppe de protéines, soit l'ADN, en choisissant l'isotope approprié. Hershey observa que les bactéries affectées par le virion étaient radioactives quand le marquage touchait l'ADN et non radioactives quand le marquage ne touchait que l'enveloppe. Bref, il démontra que c'est l'ADN du virion qui était physiquement transféré à la bactérie et qui causait le changement de métabolisme de cette dernière.

La double hélice Il restait à comprendre comment la molécule d'ADN peut emmagasiner de l'information génétique et la transmettre lors de la division cellulaire. Cet important problème occupait une grande partie des chercheurs en biologie moléculaire au début des années 1950. On savait, par analyse chimique, que l'ADN était composé, en plus d'une partie phosphate et d'une partie désoxyribose, de quatre bases ou nucléotides : l'adénine (A), la cytosine (C), la guanine (G) et la thymine (T). Les bases dites *puriques* (A et G) sont complémentaires des bases *pyrimidiques* (C et T), c'est-à-dire que A peut se lier facilement à T et, de même, C à G. Erwin CHARGAFF a montré en 1950 que les concentrations [A] et [T] étaient identiques,

réactions chimiques se produisant dans les cellules et formant le métabolisme seraient impossibles..

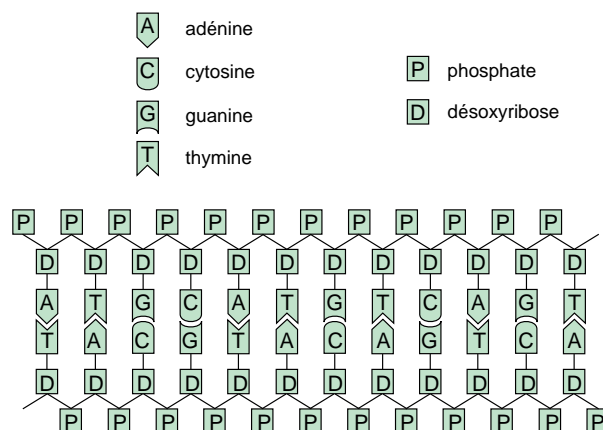


FIG. 11.3 : Schéma de la molécule d'ADN. Chaque base est soutenue par un groupe phosphate et un désoxyribose. L'adénine peut se lier à la thymine seulement et la cytosine à la guanine seulement.

comme les concentrations $[G]$ et $[C]$.

D'autre part, la molécule d'ADN avait été isolée, cristallisée et étudiée par diffraction de rayons X. Cette méthode, découverte par les physiciens W.H. Bragg et W.L Bragg dans les années 1910, fut progressivement développée au point de permettre de reconnaître la structure spatiale de molécules complexes. W.L. Bragg fonda à Cambridge un laboratoire spécialisé en biologie moléculaire où les structures de nombreuses protéines furent découvertes. C'est dans ce laboratoire que Maurice WILKINS et la jeune Rosalind FRANKLIN (1920/1958) préparèrent les cristaux d'ADN et effectuèrent les clichés qui démontraient que la molécule avait 1,0 nm de rayon et qu'elle comportait deux périodes sur sa longueur : une de 3,4 nm et l'autre de 0,34 nm.

Une partie importante du mystère de l'ADN fut levée par James WATSON et Francis CRICK en 1953, dans leur court article *A Structure for Desoxyribose Nucleic Acid*. Ces auteurs travaillaient à Cambridge et avaient de ce fait un accès direct aux travaux de Rosalind Franklin. Ils imaginèrent plusieurs modèles moléculaires de l'ADN compatibles avec sa composition et les liaisons chimiques possibles, jusqu'à ce qu'ils en trouvent un qui soit aussi compatible avec les résultats de l'analyse en rayons X. Dans ce modèle final, la molécule a une structure en double hélice. Chacun des deux brins est formé d'un squelette (phosphates et désoxyribose) sur lequel sont greffés régulièrement des bases A,C,G,T. Chaque base apparaissant sur un brin est placée vis-à-vis sa base conjuguée sur l'autre brin : A avec T et G avec C (cf. Fig. 11.3). Ceci explique l'égalité des concentrations $[A]=[T]$ et $[G]=[C]$. Les liaisons entre bases conjuguées assurent la cohésion des deux brins, qui s'enroulent l'un autour de l'autre (structure primaire de la molécule), formant une hélice de période 3,4 nm ; de plus, chaque tour de l'hélice comporte dix bases, et donc deux bases consécutives sont séparées de 0,34 nm. Quant à la longueur de la molécule, elle varie d'un chromosome à l'autre, mais comporte typiquement des centaines de milliers ou des millions de bases (Tableau 11.2).

La caractéristique la plus importante de cette structure en double hélice, qui n'échappa pas à Crick et Watson, est qu'elle permet à la molécule d'ADN de se dupliquer : avant la division cellulaire, les deux brins se séparent par l'entremise d'une enzyme : l'ADN-polymérase. Chacun des brins séparés se trouve alors à collecter dans l'environnement immédiat les bases nécessaires à la reconstruction de son complément, et ainsi d'une molécule d'ADN ont été tirées deux molécules identiques. Ainsi, un mécanisme d'ordre chimique permet, à l'intérieur d'un milieu très complexe comme la cellule, à une molécule particulière de se dupliquer et de perpétuer une information codée.

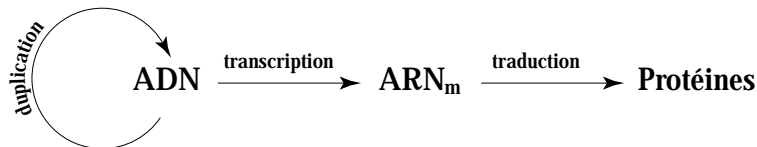
Le code génétique et la synthèse des protéines Une autre question primordiale est la nature du codage que contient l'ADN : qu'est-ce qui est codé dans un gène et quel est l'alphabet de ce code ? Il est devenu progressivement apparent, surtout depuis les expériences de Beadle et collaborateurs, que chaque

TAB. 11.2: Ampleur du code génétique chez différents organismes.

Organisme	nombre de bases
Levure (chromosome 3)	$3,5 \times 10^5$
E. Coli (génom complet)	$4,6 \times 10^6$
Humain (chromosome Y)	$5,0 \times 10^7$
Humain (génom complet)	$3,0 \times 10^9$

UUU } phénylalanine UUC UUA } leucine UUG	UCU } sérine UCC UCA UCG	UAU } tyrosine UAC UAA } non-sens UAG	UGU } cystéine UGC UGA non-sens UGG tryptophane
CUU } leucine CUC CUA CUG	CCU } proline CCC CCA CCG	CAU } histidine CAC CAA } glutamine CAG	CGU } arginine CGC CGA CGG
AUU } isoleucine AUC AUA } méthionine AUG	ACU } thréonine ACC ACA ACG	AAU } asparagine AAC AAA } lysine AAG	AGU } sérine AGC AGA } arginine AGG
GUU } valine GUC GUA GUG	GCU } alanine GCC GCA GCG	GAU } acide aspartique GAC GAA } acide glutamique GAG	GGU } glycine GGC GGA GGG

FIG. 11.4 : Correspondance entre chaque codon (ensemble de trois nucléotides de l'ARN) et les acides aminés.

FIG. 11.5 : “Dogme fondamental” de la biologie moléculaire : l’information génétique contenue dans l’ADN se perpétue par la duplication de l’ADN, est transcrite sur des brins d’ARN_m (ARN messenger), qui la transporte dans les ribosomes où elle est traduite en chaînes polypeptidiques (protéines).

gène contient en fait l'information nécessaire à la fabrication d'une protéine bien précise. Rappelons qu'une protéine (enzyme ou non) est une chaîne d'acides aminés, dont il existe 20 types dans la matière vivante. Vers le début des années 1960, on comprit comment s'effectue la synthèse des protéines à partir du code génétique. Premièrement, les nucléotides successifs le long d'un brin d'ADN sont arrangés en groupes de trois, comme s'ils étaient les lettres de mots ayant tous trois lettres. Chaque ensemble de trois nucléotide est appelé *codon* : il y en a $4^3 = 64$ possibles. Chacun des quatre acides aminés est représenté par un ou plusieurs codons, de sorte qu'un codon particulier représente un acide aminé bien précis (cf. Fig. 11.4). En plus de cela, quelques codons ne correspondent à aucun acide aminé mais jouent vraisemblablement le rôle de caractères de contrôle dans le code génétique. La découverte fondamentale de François JACOB, André LWOFF et Jacques MONOD est que l'information relative à la synthèse des protéines est transcrite à partir de l'ADN sur une molécule d'ARN_m (ARN-messenger). Ce processus de transcription est effectué continuellement lors du métabolisme par l'entremise de l'enzyme ARN-polymérase. On a pu observer par microscopie électronique les brins d'ARN qui surgissent du brin d'ADN. La molécule d'ARN est aussi constituée de quatre nucléotides (A, C, G, et l'uracile U qui remplace la thymine) et est en quelque sorte le "négatif" d'un gène. L'ARN_m est ensuite transporté hors du noyau et lu, tel une bande magnétique, par les ribosomes, lieu de la synthèse des protéines.

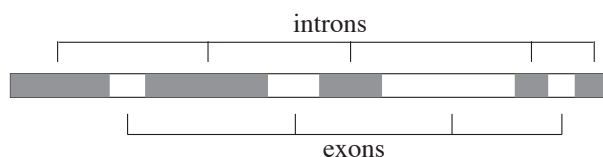


FIG. 11.6 : L'Épissage. Chaque segment d'ADN transcrit en ARN_m comporte des exons (en blanc) et des introns (en gris). Les introns sont éliminés et les exons raboutés ensemble pour porter l'information génétique dans la cellule. Le raboutage peut se faire de plusieurs manières différentes (épissage alternatif).

Les découvertes de la biologie moléculaire se sont succédées à un rythme rapide depuis la deuxième guerre mondiale. Certaines de ces découvertes posent plus de questions qu'elles n'en résolvent. Par exemple, on sait qu'une partie seulement de l'information contenue sur un brin d'ARN_m est utilisée : plusieurs segments de chaque brin sont jetés avant la synthèse des protéines. Ce phénomène s'appelle *épissage*. En fait, un gène donné, considéré comme un segment d'ADN, comporte des *exons*, en alternance avec des *introns*. Les introns ne contiennent pas d'information pertinente à la synthèse des protéines et sont éliminés lors de l'épissage, alors que les exons sont "recollés" ensemble. Cet assemblage des exons peut se faire de plusieurs manières différentes, ce qu'on appelle l'épissage alternatif. Ceci expliquerait qu'il y a beaucoup plus de variétés de protéines synthétisées que de gènes : par exemple, on estime maintenant que le génome humain comporte environ 25 000 gènes différents, alors que le nombre de protéines différentes se chiffre vraisemblablement à plusieurs centaines de milliers. Le gène moyen chez l'humain, comporte 4 exons, étalés sur 1 350 bases. Le plus long, celui de la dystrophine, comporte 79 exons étalés sur 2,4 millions de bases. On estime que de 1% à 2% du génome est formé d'exons, le reste étant des introns.

Mêmes si plusieurs mécanismes physico-chimiques détaillés ont été découverts, ils ne suffisent pas en soi à expliquer le fonctionnement de la cellule, encore moins à expliquer la vie. La grande question est de savoir si la connaissance de mécanismes de la vie constitue en soi une explication satisfaisante, ou si une connaissance plus profonde – les Anciens diraient une connaissance des *causes premières* – est nécessaire, ou même accessible à l'entendement humain.

Chapitre 12

La révolution informatique

Depuis l'invention des premiers outils, l'être humain a cherché à décharger son corps de tâches harrasantes et à multiplier ses forces. Plus tard, l'exploitation de l'énergie animale ou naturelle l'a progressivement transformé en *contrôleur* d'instruments et de machines, plutôt qu'en exécutant direct. Or, les tâches mentales, reliées au calcul ou au traitement plus général de l'information, sont les cibles ultimes de l'outillage. Nous verrons dans ce chapitre comment, à travers une progression technologique particulièrement accentuée depuis la fin de la deuxième guerre mondiale et en rapport étroit avec la science moderne, l'être humain a su prolonger ses capacités mentales à un degré insoupçonné il y a deux générations à peine. Nous dérogeons ici à notre règle, suivie lors des chapitres précédents, de ne pas se concentrer sur les progrès techniques. C'est qu'en ce tournant du siècle, l'interfécondation entre science et technique, surtout dans ce domaine nouveau de l'informatique et des technologies de l'information, est très intense.

12.1 Avant les ordinateurs : les calculateurs

Le mot *calcul* vient du latin *calculus*, qui signifie "petite pierre". Les romains, comme beaucoup de peuples antiques, utilisaient couramment de petites pierres pour éviter de mémoriser les termes d'une addition. Cette pratique se perfectionna et donna naissance à la machine à calculer la plus ancienne connue : le *boulier*, ou *abaque*. Elle permet d'entrer les données d'une opération simple (telle l'addition) et même temps que l'opération est effectuée, et a été d'une utilisation presque universelle jusqu'à tout récemment.

Le boulier requiert quand même de compter les boules à manipuler, et il est serait plus simple d'inscrire sur une machine les nombres décimaux directement et de récolter le résultat avec le moins de manipulations possible. Des machines mécaniques visant précisément ceci furent mises au point dès le XVIIe siècle. La plus connue est la *pascaline*, construite par Blaise PASCAL à l'âge de 19 ans pour soulager son père, collecteur d'impôts, du fardeau des calculs répétitifs. La mécanique de la pascaline était à base de roues dentées et la machine était malheureusement peu fiable; de plus, elle ne pouvait qu'additionner et soustraire. Avant Pascal, en 1623, un Allemand du nom de Wilhelm SCHICKARD (1592/1635) avait déjà construit une machine supérieure. Après Pascal, Leibniz transforma la pascaline en une machine capable de multiplier, mais toujours sans la fiabilité requise. Il fallu attendre le milieu de XIXe siècle avant qu'une machine, inspirée de celle de Leibniz et construite par le Français C.X. THOMAS DE COLMAR (1785/1870), fonctionne véritablement et connaisse un succès commercial.

Le XIXe siècle est marqué par les efforts de l'Anglais Charles BABBAGE (1792/1871), qui travailla de longues années, soutenu par le gouvernement anglais, à mettre au point des calculateurs mécaniques plus perfectionnés. Sa première machine, appelée *difference engine*, devait être utilisée pour calculer les tables de logarithmes. Elle ne fut pas complétée par Babbage lui-même, mais par un Suédois, P.G. SCHEUTZ (1785/1873). Si Babbage avait abandonné la construction du *difference engine*, c'est qu'il s'était tourné vers un projet plus

ambitieux : une machine pouvant effectuer toutes les opérations arithmétiques, surnommée *analytical engine*. Malheureusement, cette machine, conçue sur papier, ne fut jamais construite. Babbage avait prévu de pouvoir la *programmer*, c'est-à-dire de lui faire lire sur des cartes perforées les instructions du calcul et les données à traiter. Signalons que les cartes perforées avaient été popularisées dans le contexte des machines à tisser par Joseph-Marie JACQUARD (1752/1834), qui lui-même s'était inspiré d'une invention d'un certain BOUCHON, réalisée entre 1728 et 1734. La machine à tisser de Jacquard est le premier exemple connu d'une machine programmable, bien que ce ne soit pas un calculateur. La machine analytique de Babbage, bien que jamais construite, inspira les constructeurs de machines à calculer du début du XXe siècle.

À la suite de Babbage, les inventeurs seront plus modestes et commercialiseront des machines effectuant correctement les opérations élémentaires. Des inventeurs, tels le Français Bollée et l'Américain Burroughs, connaîtront un certain succès. Vers 1890, l'Américain Herman HOLLERITH (1860/1929) construira en plusieurs exemplaires une machine à cartes perforées destinée à compiler les résultats du recensement des États-Unis. Comme la machine de Jacquard, il ne s'agit pas d'un calculateur ; c'est plutôt la première machine construite dans le but plus général de traiter l'information. En 1896, Hollerith fonde sa compagnie, la *Tabulating Machines Corporation*, qui deviendra en 1924 l'*International Business Machines* (IBM).

La nécessité d'effectuer des calculs scientifiques motivera aussi la conception et la construction de machines dédiées à ce type de calcul. L'Américain Vannevar BUSH (1890/1974), construira, dans les années 1930, un calculateur mécanique *analogique*. Ce calculateur n'effectuait pas d'opérations arithmétiques, mais simulait par un dispositif mécanique l'intégration d'une équation différentielle. Autrement dit, une équation différentielle pertinente au phénomène physique étudié était résolue par l'intermédiaire d'un système mécanique analogue. Ce type de machine sera utilisé pendant la deuxième guerre mondiale pour les besoins de la ballistique. Plus tard, des ordinateurs analogiques seront construits sur la base de circuits électriques, plus fiables et surtout beaucoup plus simples que les systèmes mécaniques. Le principal désavantage des ces calculateurs analogiques est qu'ils ne pouvaient servir qu'à résoudre une catégorie étroite de problèmes : ils n'étaient pas *universels*.

Les besoins des différentes armées lors de la deuxième guerre mondiale stimuleront la conception et la construction de calculateurs encore plus puissants. Aux États-Unis, l'armée contractera à la *Moore School* de l'Université de Pennsylvanie la mise au point d'un calculateur électronique, le plus puissant jamais réalisé. Appelé ENIAC (Electronic Numerator, Integrator, Analyser and Computer), sa conception dura un an et sa construction un an et demi, au coût de 500 000\$. Il ne fut terminé que trois mois après la fin de la guerre. Il comptait 17 468 lampes électroniques, 70 000 résistances, 10 000 capacités, 1 500 relais¹ et 6 000 commutateurs manuels. Il consommait 150 kW de puissance, l'équivalent d'une vingtaine de chauffages domestiques. De nombreuses lampes ou relais devaient être remplacées souvent. Les relais étaient susceptibles d'être rendus inopérants quand un moustique (*bug*) s'y écrasait, ce qui est à l'origine de l'expression courante pour désigner les erreurs de programmation (il est bien sûr commode de blâmer la machine pour une erreur commise par l'opérateur). L'ENIAC n'est pas un ordinateur, mais une calculatrice géante. Sa programmation, à refaire pour chaque calcul, requérait de refaire manuellement une partie des circuits et de changer l'état de plusieurs commutateurs manuels. Une fois ces instructions longuement codées, l'exécution était très rapide, car l'ENIAC était cadencé à 200 kHz, ce qui lui permettait d'effectuer environ 330 multiplications par seconde.

12.2 Les ordinateurs

L'ENIAC sera le dernier grand calculateur de son genre. Ses concepteurs principaux, Presper ECKERT et John W. MAUCHLY, se rendent compte assez rapidement de ses limitations, la principale était sa programmation manuelle, qui ralentit toutes les opérations. Ils ont alors l'idée (i) d'une machine qui pourrait emmagasiner les instructions en mémoire tout comme elle emmagasine les données et (ii) de consulter à ce sujet l'un des plus grands mathématiciens du moment : John VON NEUMANN (1903/1957).

Von Neumann réfléchit à l'architecture logique d'une machine pouvant effectuer la tâche accomplie par

¹Un relai est un commutateur contrôlé électriquement, utilisé à l'époque essentiellement dans l'industrie téléphonique.



FIG. 12.1 : À droite, l'ENIAC. À gauche, le premier microprocesseur, l'Intel 4004, d'une puissance comparable.

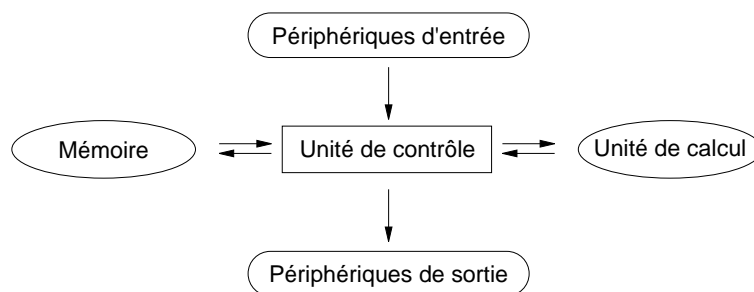


FIG. 12.2 : Schéma illustrant l'architecture proposée par von Neumann, encore employée de nos jours dans la vaste majorité des ordinateurs.

l'opérateur humain de l'ENIAC. Ce calculateur serait alors *automatique*. En juin 1945, il écrit un rapport dans lequel il décrit l'architecture d'une future machine appelée EDVAC (*Electronic Discrete VAriable Computer*), qui ne sera jamais construite avec ce nom mais inspirera les premiers ordinateurs. L'essentiel de l'architecture proposée par von Neumann consiste à confier la gestion du calcul à une *unité de contrôle* (*Central Processing Unit*, ou CPU, voir Fig. 12.2). L'unité de contrôle gère les instructions d'un *programme* et coordonne les autres unités de l'appareil : mémoire, entrée/sortie et unité de calcul. Les instructions sont exécutées de manière séquentielle. Le développement foudroyant des ordinateurs depuis 1950 est le fruit d'une foule de développements techniques, certains extrêmement sophistiqués, mais l'architecture de base des ordinateurs est toujours la même que celle imaginée par von Neumann. On parle désormais d'*ordinateur* et non de *calculateur*, même si la distinction ne fut pas faite à l'époque (et n'est toujours pas faite en anglais), car cette machine hypothétique de von Neumann fait plus que calculer : elle ordonne de l'information, en particulier des instructions de calcul.

Von Neumann fut inspiré dans sa réflexion par les travaux d'un jeune mathématicien anglais, Alan TURING (1912/1954). En 1936, Turing précisa la notion d'*algorithme* et imagina une machine automatique (dite *machine de Turing*) qui pouvait résoudre n'importe lequel problème : c'était une machine *universelle*, qui fonctionnait de manière automatique en suivant machinalement des instructions exprimées en fonction d'opérations logiques élémentaires et en écrivant, copiant ou lisant de l'information dans un registre. Turing ne voulait pas vraiment concevoir une machine *réelle*, mais une machine *formelle*, dans le but de réfléchir aux limites de la logique mathématique par une approche "constructive".

Le tout premier ordinateur à avoir fonctionné a été construit à Manchester de 1946 à 1948 et surnommé le *Manchester Baby*. Il a été suivi en 1949 du *Manchester MARK 1* (ne pas confondre avec le *Harvard MARK 1*, un calculateur classique précédant l'ENIAC et beaucoup moins puissant). Innovation technique : la mémoire du Manchester MARK 1 était basée sur des tubes à rayons cathodiques. Cet ordinateur fut un exemplaire unique. L'ordinateur à ses débuts est réservé aux militaires, qui l'utilisent en particulier dans les laboratoires de recherche sur les armements nucléaires. Le premier ordinateur civil fut le UNIVAC 1 (UNIVersal Automatic Computer), créé et commercialisé en 1951 par Eckert et Mauchly qui fondèrent leur propre compagnie. Ce sont cependant les compagnies existantes, qui contrôlaient déjà le marché des machines mécaniques de calcul ou de traitement de l'information, qui domineront le marché des ordinateurs, en particulier IBM, qui livrera son modèle 701 aux militaires en 1951 et commercialisera son modèle 650 en 1953.

On distingue généralement *cinq* générations d'ordinateurs, qui diffèrent essentiellement (sauf la cinquième) par les moyens techniques utilisés. La *première génération* (1948–1955) est généralement caractérisée par l'utilisation de lampes électroniques (*vacuum tubes*) et, accessoirement, par l'utilisation de tambours magnétiques pour la mémoire. Ces machines sont peu universelles, car le *langage machine* utilisé pour leur programmation est souvent conçu sur mesure en vue d'applications précises. La *deuxième génération* (1956–1963) est généralement caractérisée par le remplacement des lampes par des *transistors* ; la mémoire y est souvent constituée de noyaux magnétiques (*magnetic cores*) et le langage machine a fait place à l'*assembleur*, langage de programmation plus évolué, mais tout de même assez rébarbatif. La *troisième génération* (1964–1971) remplace un assemblage de transistors individuels par des *circuits intégrés*, c'est-à-dire par des dispositifs à semiconducteurs beaucoup plus petits dans lesquels sont intégrés différents éléments de circuits (résistances, transistors, capacités, etc.). Cette génération est aussi caractérisée par l'utilisation d'un *système d'opération*, un programme central qui coordonne l'exécution de plusieurs autres programmes. Plusieurs systèmes d'opérations ont vu le jour, mais les seuls encore en utilisation fréquente sont plus récents : UNIX (ou plutôt ses différentes incarnations, dont Linux et Mac OS) et Microsoft Windows. La *quatrième génération* est caractérisée par l'emploi de *microprocesseurs*, c'est-à-dire d'unités de contrôle, de traitement et de mémoire rassemblées sur une même puce de silicium, rendus possibles grâce aux progrès de la technologie LSI (*large scale integration*) et VLSI (*very large scale integration*) de fabrication des circuits intégrés. Le premier microprocesseur fut commercialisé par la société Intel en 1971 (le Intel 4004). L'utilisation de microprocesseurs fabriqués à une échelle industrielle permettra la commercialisation de petits ordinateurs et même d'ordinateurs personnels à la fin des années 1970. Il est plutôt difficile de définir ce qui caractérise la *cinquième génération*, et ce terme est utilisé à tort et à travers pour mousser diverses innovations réalisées (par exemple une architecture parallèle) ou souhaitées (par exemple la capacité d'apprentissage).

12.3 Les progrès de l'électronique

La révolution informatique fut rendue possible par les progrès technologiques inouïs de l'*électronique*, cette discipline qui se préoccupe de la propagation et du traitement des signaux électriques. Le point de départ de cette révolution technologique est l'invention du *transistor*. Nous allons ici brièvement relater les événements et circonstances entourant cette découverte et les développements subséquents.

L'électronique est née des besoins de l'industrie des télécommunications. Les techniques de communications à distances les plus simples sont très anciennes : on pense aux signaux lumineux, aux signaux de fumée ou au tam-tam africain. La première utilisation à grande échelle des techniques visuelles de télécommunication remonte à 1794, alors que Claude CHAPPE met au point son système télégraphique pour servir les besoins militaires de la France révolutionnaire. Dans ce système, des signaux visuels étaient émis et relayés par plusieurs stations, à l'aide de bras articulés. Un code avait été mis au point pour représenter l'alphabet. Un total de 116 stations s'échelonnaient de Paris à Toulon et, par beau temps, un message pouvait prendre aussi peu que vingt minutes pour parcourir ce trajet.

C'est en 1832 que le peintre américain Samuel MORSE conçoit le *télégraphe électrique*, réalisé en pratique en 1838 et finalement commercialisé quelques années plus tard. C'est en quelque sorte la naissance de l'électronique. Morse invente un code, basé sur des impulsions courtes, des impulsions longues et des silences, qui permet de transmettre économiquement un message alphabétique. Un véritable codage binaire (et non ternaire comme celui de Morse) sera proposé par le Français Émile Baudot en 1848, mais il est à noter que c'est Francis Bacon qui, au tournant du XVII^e siècle, avait le premier proposé l'utilisation d'un codage binaire de l'alphabet, accompagné de mesures de cryptographie, dans le but de servir la diplomatie secrète. La télégraphie va inspirer des projets aussi audacieux que la pose d'un câble transatlantique sous-marin des États-Unis jusqu'à l'Angleterre (dans le but immédiat de relier les bourses de *Wall Street* et de la *City*). Ce projet, achevé en 1866, donnera à William Thomson son titre de Lord Kelvin, pour avoir contribué de multiples façons au projet, entre autre par l'invention d'un galvanomètre à miroir très sensible permettant de détecter le signal électrique émergeant du câble.

La mise au point de la télégraphie sans fil dans les années 1890–1900 causera une grande déception aux capitalistes qui avaient investi dans la pose des câbles sous-marins, et créera un besoin criant de dispositifs pouvant amplifier un signal électrique, car la détection des ondes radios nécessite le traitement de signaux très faibles. C'est en 1906 que Lee DeForest invente la triode, une tube électronique (lampe) capable d'amplifier un signal électrique. Cette invention a rendu possible l'avènement de la radio. D'autre part, depuis l'invention du téléphone par Alexander Graham BELL (1847/1922) en 1876, les réseaux téléphoniques ont besoin de répéter leur signaux pour les transmettre sur de longues distances, ce qui nécessite aussi un dispositif d'amplification. L'électronique sert donc tous les canaux de communication.

Aux États-Unis, jusqu'aux années 1980, la téléphonie est le quasi-monopole de l'*American Telephone and Telegraph* (ATT), compagnie géante, héritière de la première compagnie créée par Bell lui-même. ATT comprend un bras manufacturier, la *Western Electric*, et un bras de recherche et développement, les laboratoires Bell (*Bell Labs*). Depuis les années 1930, on croit qu'il est possible de réaliser un amplificateur basé sur des cristaux semiconducteurs. Un *semiconducteur*, comme le germanium ou le silicium, est une substance cristalline dont les propriétés de conduction électrique sont intermédiaires entre un métal et un isolant : sa conductivité électrique est beaucoup plus faible que celle d'un métal, mais elle augmente avec la température, contrairement à celle d'un métal. La compréhension de cet étrange comportement des semiconducteurs date de 1930 environ, alors qu'on applique la mécanique quantique à l'étude des solides cristallins. Les laboratoires Bell abritent un groupe de recherche sur les semiconducteurs, à la tête duquel est placé le jeune William SHOCKLEY (1910/1989) et auquel appartiennent W.H. BRATTAIN (1902/1987) et John BARDEEN (1908/1991). Après de multiples tâtonnements, ce groupe mettra au point le premier dispositif amplificateur à base de semiconducteurs en décembre 1947, dispositif qui sera appelé *transistor* (plus précisément, *transistor à contact ponctuel*), et qui vaudra à ses auteurs le prix Nobel de physique en 1956.² La nouvelle de l'invention du transistor est gardée secrète jusqu'en juin 1948 et, après avoir eu le feu vert de l'armée, Bell

²Bardeen se méritera un deuxième prix Nobel de physique en 1972, pour l'explication théorique de la supraconductivité. C'est la seule personne à avoir reçu deux fois le prix Nobel de physique.

Labs annonce sa découverte au public. La nouvelle paraît en page 46 du *New York Times*, dans la rubrique *News of the Radio* qui couvre les programmes d'émission de radio ! Sachant la révolution industrielle qui a suivi au cours des décennies suivantes, on peut juger de la difficulté qu'ont les médias à départager les nouvelles sensationnelles, des potins et des événements réellement importants. . . Par la suite, Shockley modifie le design original et le premier *transistor bipolaire*, plus fiable et efficace que son prédécesseur, fonctionne en 1950.

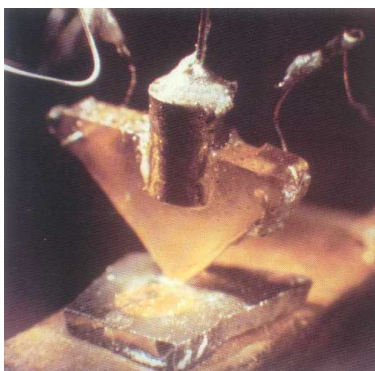


FIG. 12.3: Le tout premier transistor, dit *transistor à contact ponctuel*, fabriqué en décembre 1947.

L'avantage technique du transistor face aux lampes amplificatrices est sa petite taille et sa faible consommation d'énergie (les lampes dégagent beaucoup de chaleur). Il est vrai que les premiers transistors coûtent plus chers que les lampes et sont moins efficaces, mais quelques années suffisent pour que la situation change du tout au tout. Il est dès lors possible d'envisager une miniaturisation des circuits électroniques et une augmentation de leur complexité. Les applications potentielles du transistor sont vastes et dépassent largement le monde de la téléphonie, auquel ATT est confiné ; en effet, si ATT jouit d'un monopole sur le téléphone, c'est qu'elle a conclu une entente avec le gouvernement américain, en promettant de ne pas se lancer dans d'autres secteurs industriels. Elle doit donc se résigner à divulguer les secrets du transistor. En avril 1952, les laboratoires Bell organisent un symposium où s'inscrivent d'autres firmes (au coût de 25 000\$ par participant) qui peuvent par la suite se lancer dans la production des transistors.

L'une de ces firmes est *Texas Instruments*, qui embauche en 1959 un jeune ingénieur du nom de Jack KILBY, qui désire intégrer sur un même substrat de silicium (le semiconducteur de choix depuis qu'on a appris à le purifier davantage) plusieurs éléments de circuit (transistors, résistances, capacités). Il construit le premier *circuit intégré* en 1959. La miniaturisation des circuits a progressé sans cesse depuis, ainsi que la prolifération des firmes spécialisées dans la production de circuits à base de semiconducteurs. Shockley, désireux de profiter financièrement de ses idées, quitte Bell Labs en 1955 pour fonder sa propre firme, le *Shockley Semiconductor Laboratory*. Il s'établit dans son état natal (la Californie), à Palo Alto. En 1957, huit de ses employés (les "huit traîtres") quittent la firme de Shockley pour fonder une filiale de la *Fairchild Camera Company*, qui s'établit à proximité. Par la suite, le même processus de démission/fondation se poursuit et une centaine de firmes verront le jour dans la même région au cours des vingt années suivantes. Cette région portera le surnom de *Silicon Valley* (La vallée du Silicium). L'une de ses entreprises, fondée en 1965 par deux des "huit traîtres" (Gordon MOORE et Bob NOYCE), veut pousser plus avant encore l'intégration des circuits et choisit le nom *Intel* (pour INTEgrated ELEctronics). Cette firme produit, en 1971, le premier "ordinateur sur une puce", ou *microprocesseur*, le Intel 4004, qui compte 2300 transistors. En 1978, elle lance le Intel 8086, qui compte 29 000 transistors et est cadencé à 4,77 MHz. Tout une série de processeurs suivent : 286 (1982), 386 (1985), 486 (1989), Pentium (1993), Pentium II (1997), Pentium III (1999), Pentium IV (2002), ce dernier comptant environ 42 millions de transistors.

Les technologies de l'information sont encore en plein évolution, tant sur le plan matériel que sur le plan logiciel et, plus généralement, sur l'éventail des applications qu'elles suscitent. Toute prospective dans ce domaine est un exercice dangereux. Toute technologie finit un jour par plafonner. Il est clair en particulier que la technologie des circuits imprimés qui a mené à la miniaturisation va frapper dans quelques années la

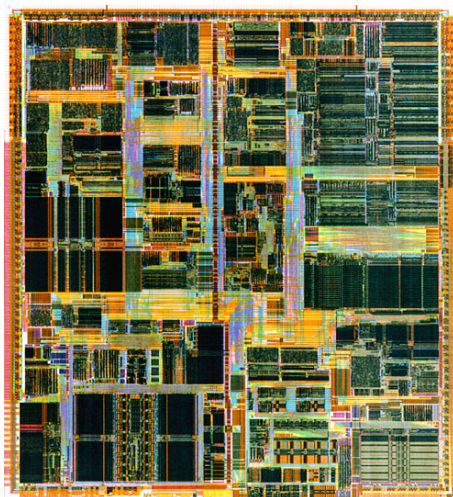


FIG. 12.4: Le Pentium II (1997) contenait environ 7,5 millions de transistors.

limite des petites tailles en deçà desquelles les lois physique macroscopiques qui régissent le comportement des circuits ne seront plus applicables : il faudra alors repenser ces microcircuits à l'aide de la mécanique quantique, ou arrêter là notre effort de miniaturisation. Il est possible que les futurs éléments de circuits soient basés sur des amas de quelques atomes, ou sur des molécules ayant des fonctions particulières. Le ralentissement déjà perceptible dans la miniaturisation des circuits pousse les fabricants à mettre l'accent sur le parallélisme (processeurs à plusieurs coeurs, etc.). Il est enfin probable qu'il survienne quelque chose que nous ne pouvons présentement imaginer, car s'il est une chose que l'histoire a démontré, c'est que les perspectives deviennent rapidement les plus amusantes reliques de l'esprit humain...

Chronologie sommaire du développement des technologies de l'information

- 1936 Publication par Alan TURING des principes généraux des machines automatiques suivant un algorithme.
- 1945 Proposition de von Neumann pour l'architecture des calculateurs automatiques. Inauguration de l'ENIAC, le dernier grand calculateur avant l'ordinateur.
- 1947 Invention du transistor, par BARDEEN, BRATTAIN et SHOCKLEY, aux laboratoires Bell.
- 1948 Le Manchester MARK 1, premier ordinateur construit sur le plan de von Neumann.
Le mathématicien américain Claude Shannon publie sa théorie mathématique des communications et introduit l'acronyme bit (BInary digiT) pour désigner le plus petit élément d'information.
Norbert Wiener publie *Cybernetics, or Control and Communication in the Animal and the Machine*. C'est le lancement de la cybernétique.
- 1949 EDSAC, premier ordinateur américain, basé sur le design de l'EDVAC par von Neumann.
- 1950 Invention de l'assembleur, langage de programmation de bas niveau.
- 1951 Le UNIVAC 1, premier ordinateur commercial.
- 1952 Premier ordinateur produit par IBM : le modèle 701.
- 1954 Lancement du modèle 704 d'IBM, doté d'une mémoire de 32768 mots de 36 bits (= 144 K).
- 1955 Premier réseau informatique : SABRE, créé pour American Airlines.
W. Shockley quitte Bell pour fonder sa propre compagnie, à Palo Alto (Californie), la première de ce qui deviendra *Silicon Valley*.
- 1956 Le premier ordinateur à transistors : le TRADIC de Bell, marque le début de la deuxième génération.

- 1957** Création, par John BACKUS, du premier langage de programmation supérieur : le FORTRAN.
Huit employés de Shockley (les “huit traîtres”) quittent sa firme pour fonder la *Fairchild Semiconductor*.
Au cours des vingt années suivantes, 100 firmes sont fondées dans la *Silicon Valley*, dont 24 comptent parmi leur fondateurs des anciens de la Fairchild.
- 1958** Premier circuit intégré, réalisé par Jack KILBY, de Texas Instruments.
- 1959** Le premier ordinateur interactif : le PDP 1, de la Digital Equipment Corporation.
- 1962** Production des premiers transistors à effet de champ commerciaux.
- 1964** Création du langage de programmation BASIC, au Dartmouth College.
- 1965** Fondation de la compagnie Intel, dans la *Silicon Valley*.
- 1968** Lancement du réseau ARPANET, l’ancêtre d’INTERNET.
Invention de l’environnement fenêtres-souris, commercialisée seulement en 1981 par Xerox et repris pour le Apple Macintosh en 1984.
- 1969** Début de la création du système d’opération UNIX.
- 1970** Première mémoire vive (RAM) à base de semiconducteurs : le Intel 1103, avec 1K de mémoire.
- 1971** Création du premier microprocesseur : le Intel 4004, qui compte 2300 transistors.
- 1971/73** Création du langage de programmation C, étroitement lié au système d’opération UNIX.
- 1977** Premier ordinateur Apple.
- 1981** IBM se lance dans la commercialisation des ordinateurs personnels.
- 1983** Création du langage de programmation C++.
- 1984** Lancement du *Macintosh*, de Apple, premier succès commercial d’un ordinateur à environnement fenêtre-souris.
- 1986** Lancement du système d’opération *Windows 1.1*, par Microsoft.
- 1989** Création du *World Wide Web* et du langage HTML, au Centre Européen de Recherche Nucléaire (CERN).
- 1994** Intel lance le *Pentium*, microprocesseur contenant au-delà de cinq millions de transistors.
- 1998** Fondation de *Google*, l’outil de recherche internet le plus sophistiqué.

Épilogue

C'est ici que prend fin notre survol rapide et partiel de l'histoire des sciences. Nous n'avons présenté que quelques sujets, en évitant de s'aventurer dans des domaines qui exigeraient trop de préparation technique. Il est maintenant temps de soulever quelques questions d'ordre plus général sur la valeur et l'évolution générale des sciences. En particulier, qu'est-ce qui fait qu'une théorie scientifique particulière est reconnue comme vraie, qu'un fait est accepté comme scientifiquement démontré ? Comment une théorie naguère jugée comme acceptable peut-elle être rejetée et remplacée par une nouvelle théorie ? Quels sont les facteurs de progrès (ou de stagnation) de la science ? Ces questions ne sont pas à proprement parler scientifiques, en ce sens que la méthode scientifique ne peut pas vraiment y apporter une réponse. Ce sont des questions philosophiques, ou même sociologiques. Par contre, une certaine expérience scientifique est indispensable pour y réfléchir convenablement.

Plusieurs penseurs célèbres se sont intéressés depuis Descartes à la philosophie des sciences ou, plus généralement, à la philosophie de la connaissance (épistémologie). Il ne s'agit pas ici de procéder à une revue, même succincte, des principales thèses proposées par les philosophes des siècles passés, mais seulement d'en mentionner deux qui ont connu un certain succès au cours du XXe siècle.

Popper et la falsifiabilité L'une des idées souvent véhiculées sur la méthode scientifique est qu'elle procède par induction, c'est-à-dire qu'elle formule des théories ou des modèles à partir d'observations et d'expériences. Le philosophe britannique d'origine autrichienne Karl POPPER (1902/1994) s'oppose à cette vision, ou plutôt y apporte un raffinement. Selon lui, la science procède plutôt par essai et erreur que par induction. L'expérience ne sert qu'à contrôler les théories, c'est-à-dire à rejeter celles qui sont contraires aux observations. L'imagination et la créativité jouent donc un rôle essentiel dans le développement scientifique, car elles sont derrière le développement des théories, l'expérimentation ayant un rôle plus "répressif".³

Pour qu'une théorie soit rejetée par l'observation ou l'expérience, elle doit être *falsifiable*, c'est-à-dire formulée de telle manière à ce qu'elle puisse faire des prédictions propres à être contredites ou, au contraire, confirmées. Pour Popper, là est la différence essentielle entre une théorie scientifique et une théorie non scientifique. Par exemple, Popper ne considérerait pas la psychanalyse freudienne comme une théorie scientifique. Selon lui, il n'était pas possible, en pratique, de démontrer la fausseté des préceptes de la psychanalyse, non pas parce que cette théorie est vraie, mais parce qu'elle est formulée de manière suffisamment floue qu'on ne peut pas la soumettre clairement à l'épreuve de l'expérience. Par contre, la théorie de la relativité générale d'Einstein est scientifique : elle formule des prédictions qui peuvent être clairement confirmées ou infirmées, comme par exemple la déviation des rayons lumineux qui passent à proximité du disque solaire.

Une théorie qui voit ses prédictions confirmées par l'expérience n'est cependant pas démontrée vraie. Elle n'est que corroborée par l'expérience, et renforcée de ce fait. Elle peut être acceptée provisoirement par la communauté scientifique, jusqu'à ce qu'elle soit éventuellement contredite par l'expérience.

Les idées de Popper ont influencé une génération de philosophes des sciences, mais ont aussi été beaucoup critiquées. Popper lui-même est d'accord avec certaines de ces critiques. Par exemple, il est bien reconnu

³Ceci ne signifie pas que les théoriciens ont un rôle purement positif à jouer et les expérimentateurs un rôle purement négatif. L'imagination et la créativité sont toutes aussi importantes aux seconds qu'aux premiers. Popper affirme que le résultat d'une expérience en soi ne peut générer une nouvelle théorie ; il peut cependant stimuler l'imagination et la créativité qui permettent la formulation d'hypothèses nouvelles, que ce soit par des expérimentateurs ou des théoriciens.

que l'interprétation des expériences et observations fait aussi appel à une bonne dose de théorie : les faits "bruts" n'existent pas vraiment. Ainsi, lorsqu'on fait face à une contradiction entre une expérience et une théorie, quel élément doit être blâmé ? La théorie qu'on désire tester, ou la théorie (ou la chaîne de théories) qui préside à l'interprétation des données de l'expérience ? Il n'est alors pas clair qu'aucune théorie ne soit vraiment falsifiable. Le principal défaut de l'oeuvre de Popper est peut-être qu'il a voulu formaliser la méthode scientifique de manière trop précise, alors que la méthode scientifique ne se prête pas à une telle codification. Un autre défaut notable des thèses de Popper est qu'elles sont formulées de manière négative et non de manière positive : une théorie qui a résisté à tous les tests expérimentaux n'est toujours pas reconnue comme vraie, même si le niveau de confiance en elle est très élevé, et Popper ne porte pas le gros de ses efforts à discuter de ce "niveau de confiance".

Kuhn et les révolutions scientifiques L'un des critiques les plus immédiats des travaux de Popper sera Thomas Kuhn, qui publiera en 1962 *La structure des révolutions scientifiques* [42]. L'oeuvre de Kuhn a connu un retentissement énorme (environ un million de copies vendues en 20 langues). Kuhn définit plutôt la valeur d'une théorie scientifique en fonction de l'assentiment de la communauté scientifique. Résumons, s'il est possible, les idées de l'auteur :

1. La Science est avant tout basée sur un ensemble de théories générales, ou manières de pensée, que Kuhn appelle des *paradigmes*. Un exemple de paradigme est la mécanique de Newton : une vision du monde matériel dans laquelle la matière est formée de particules en mouvement obéissant à des lois de forces (comme la force de gravité ou la force électrique) et aux lois du mouvement énoncées par lui. Un autre exemple de paradigme, plus récent, est le "dogme fondamental de la biologie moléculaire", selon lequel la vie repose sur une production de protéines à l'intérieur des cellules, programmée dans le code génétique (gènes formés de segments d'ADN) et exprimée par des mécanismes de transcription de l'ADN vers l'ARN_m [un gène = une séquence polypeptidique]. Comme dernier exemple de paradigme, mentionnons la théorie du big bang, qui affirme que l'Univers est apparu il y a environ 14 milliards d'année à la suite d'une explosion initiale et que l'expansion subséquente à cette explosion est toujours en cours. Un paradigme est plus qu'une théorie particulière : c'est un cadre de pensée adopté par les membres de la communauté scientifique. Il y a bien sûr des sous-paradigmes, s'attachant à des objets plus particuliers et spécialisés, dans chaque discipline ou sous-discipline scientifique.
2. Dans l'évolution des sciences, on distingue de longues périodes de *science normale*, entrecoupées de *révolutions scientifiques*. La science normale est basée sur des paradigmes fixes, qui ne sont que raffinés et affermis par le travail des scientifiques. Les faits ou phénomènes qui ne semblent pas être compatibles avec les paradigmes reconnus sont jugés sévèrement, parfois ignorés, ou simplement considérés comme des anomalies sans gravité. La gros du travail des scientifiques consiste à chercher de nouvelles confirmations du paradigme accepté. Kuhn compare la science normale à la résolution d'un casse-tête dont l'image est connue à l'avance.
3. Par contre, lorsque le nombre d'anomalies est trop grand ou qu'elles sont trop gênantes, des théories rivales font leur apparition. Elles sont incompatibles avec le paradigme accepté, mais peuvent expliquer les anomalies gênantes. Lorsque suffisamment de scientifiques reconnaissent ces théories comme meilleures que les anciennes, un nouveau paradigme est né et une révolution scientifique se produit. La révolution est un changement brutal de paradigme, un changement d'allégeance de la communauté scientifique. Pour qu'une révolution ait lieu, une accumulation d'anomalies ne suffit pas : un nouveau paradigme doit aussi être proposé. Typiquement, les scientifiques plus jeunes adoptent plus facilement le nouveau paradigme que les plus âgés et plusieurs scientifiques conservent l'ancien paradigme, qui peut encore servir si on ne s'intéresse pas aux questions qui ont mené à sa perte. Généralement, une révolution scientifique...
 - (a) Modifie ce qui est acceptable comme solution à un problème.
 - (b) Modifie le type de problème étudié.
 - (c) Permet de découvrir de nouvelles choses en des endroits pourtant déjà visités.
 - (d) Transforme l'imagination scientifique.

Cette analyse de Kuhn est basée sur son expérience personnelle du progrès scientifique et sur sa vaste connaissance de l'histoire des sciences.⁴ En particulier, la révolution "par excellence" qu'il a personnellement connue est le passage de la physique classique (dite de Newton) à la physique quantique dans les années 1920. Cet exemple suffit pour illustrer toutes les conclusions générales de Kuhn : le nombre croissant de phénomènes inexpliqués (et inexplicables) par la physique classique à partir de la fin du XIXe siècle a mené à diverses hypothèses ou théories imparfaites (comme la théorie de l'atome de Bohr de 1913). Ce n'est qu'avec la formulation de la mécanique quantique en 1925/1926 qu'un nouveau paradigme est apparu. Il a été rapidement adopté par les physiciens plus jeunes, moins rapidement par d'autres. Le nombre de problèmes formulés dans ce nouveau paradigme étant énorme et le succès de leur résolution phénoménal, le paradigme s'est imposé malgré les problèmes philosophiques (ou esthétiques) qu'il soulevait. Certains, dont de Broglie, l'ont accepté comme solution temporaire, tout en prétendant qu'une théorie plus profonde, exempte d'indéterminisme, restait à formuler. Un grand nombre de phénomènes connus depuis des décennies, voire des siècles (par exemple, le magnétisme des aimants) ont enfin reçu une explication. En quelques courtes années, la mécanique quantique faisait partie de la science normale.

La science dit-elle la vérité ? L'une des conséquences des travaux de Kuhn a été la mise en évidence des forces sociales à l'oeuvre dans l'évolution des sciences. Par "forces sociale", on entend ici tous les facteurs humains comportant des rapports de force ou d'influence qui sont en marge de la méthode scientifique, mais qui ont leur importance. Remarquons tout de suite que ces facteurs humains étaient connus depuis belle lurette et que Kuhn n'a rien inventé ici, mais la notoriété de son oeuvre, basée en bonne partie sur la relative simplicité de ses théories, a répandu cette idée que les facteurs humains étaient peut-être déterminants dans l'évolution scientifique. De là cette opinion, répandue dans certains secteurs de la sociologie des sciences, que la science est un pur "produit social" (*social construct*, en anglais). Cette vision extrémiste nie tout valeur indépendante à la science et la met sur le même pied que d'autres croyances de nature très différente. Ainsi, dans cette vision, la théorie du big bang n'est ni plus ni moins valable que le récit de la création de la Genèse, ou que le mythe de la création des indiens Hopi ; tous sont des croyances avec un lot d'adhérents, et elles sont équivalentes à ce titre.

Il va sans dire qu'un tel point de vue est absurde, car il nie toute valeur à la méthode scientifique, sans compter qu'il nie aussi la notion (subtile, admettons-le) de "réalité". L'erreur banale de ces "sociologues des sciences" est de tout ramener à un phénomène sociologique. On pourrait justement affirmer que la thèse selon laquelle la science est déterminée uniquement par des forces sociales n'est pas falsifiable ! Ce qu'il faut savoir, c'est si les forces sociales qui finissent par l'emporter sont celles qui sont appuyées par la méthode expérimentale, ou celles qui ne procèdent que de la personnalité des scientifiques, de leurs intérêts, leurs préjugés, etc.

En réalité, l'intérêt, la personnalité et les préjugés ont une influence importante, mais non déterminante à long terme. Il est vrai que les scientifiques, souvent insuffisamment instruits en histoire et philosophie des sciences, ont parfois une vision naïve du progrès scientifique et de la valeur générale de la science. Cependant, ce qui différencie la science d'une croyance est ce lien avec la réalité assuré par la méthode scientifique et par cette attitude citée en prologue de ces notes (p.). Les forces sociales, bien réelles, prennent surtout la forme d'un certain conservatisme, salubre par ailleurs, qui permet de constituer et conserver des paradigmes et d'éviter un stérile chaos d'idées. N'oublions pas que chaque révolution est basée sur le paradigme qu'elle détruit...En bref, le défaut majeur des thèses de Kuhn est qu'elles font jouer à la méthode expérimentale un rôle effacé, non déterminant.

En somme, la science dit-elle la vérité ? Question naïve, que seule l'inexpérience permet de poser. La notion de vérité est une notion logique, mathématique ; aucune théorie scientifique n'est vraie (ou fausse). La question est plutôt de savoir si les paradigmes présents sont satisfaisants ou non. Leur pouvoir de prédiction est-il bien établi ? Les anomalies sont-elles sérieuses ? Les questions qu'ils soulèvent ont-elles un sens ? Par exemple, la théorie de la gravitation universelle de Newton est-elle satisfaisante ? Fondamentalement, elle a été supplantée par la théorie de la relativité générale d'Einstein, et apparaît comme un cas particulier de cette dernière dans la limite des faibles vitesses et des faibles champs gravitationnels. Cependant, elle demeure fort utile dans la vaste majorité des applications ; la "validité" de cette théorie est donc en bonne

⁴Pour une critique de la pensée de Kuhn et une analyse de ses motivations, voir l'article de Weinberg [87].

partie une question de précision. Plusieurs paradigmes “dépassés” conservent leur utilité, bien après leur mort officielle.

La valeur d’un paradigme est jugée par une communauté scientifique à l’aide de critères techniques reposant sur la méthode expérimentale. Le jugement général de la population ou des institutions publiques (c’est-à-dire provenant de l’extérieur de la communauté scientifique concernée) n’est ici d’aucun recours... En ce sens, la science est une institution antidémocratique. Par contre, elle est ouverte à tous.

L’avenir de la science Il reste que la science est toujours en construction, et qu’elle se base sur une communauté d’individus prêts à s’y engager. Elle existe tant que cette communauté se renouvelle avec les générations. Elle périclité quand cette communauté s’amenuise ou perd de vue ses principes moteurs. La science antique a disparu avant tout parce que la communauté scientifique de l’Antiquité a disparu, laissant derrière elle des fossiles, des oeuvres marquantes, qui ont permis un renouveau progressif des sciences (en Occident, du moins) un millénaire plus tard. La science n’est pas non plus un édifice monolithique ; elle comporte plusieurs disciplines et sous-disciplines qui évoluent différemment. Certaines sont en explosion, d’autres sont victimes de leur succès parce qu’elles n’ont plus de problèmes intéressants à résoudre.

Il est pratiquement impossible de prédire les révolutions, scientifiques ou autres. La prospective scientifique est un exercice possible à court terme, dans le cadre de la science normale, mais devient rapidement futile et ridicule quand elle s’exerce à long terme. Au-delà des disciplines scientifiques particulières, la science en général est-elle promise à un avenir brillant ? La réponse à cette question passe par la relation entre la communauté scientifique et la société en général. La société donne à la science ses moyens de fonctionner (recrutement et financement) et s’attend en retour à ce que la science lui fournisse (i) des technologies facilitant l’existence et (ii) une vision du monde cohérente. La première promesse se réalise généralement, quoique souvent à long terme et à travers des processus complexes comportant des aspects commerciaux ou industriels aussi importants que les aspects techniques et scientifiques. La deuxième est au coeur de la motivation des scientifiques, mais n’intéresse pas tout le monde... Ici science et religion se rejoignent un peu dans leurs objectifs. Ici se trace aussi le périlleux chemin de la vulgarisation scientifique, le long duquel plusieurs objets se perdent, mais qu’il faut obligatoirement emprunter si on désire que cette entreprise continue...

Bibliographie

- [1] Fred AFTALION, Histoire de la chimie, Paris : Masson, 1988, QD 11 A37 1988 [SCI]
- [2] Thomas d'AQUIN, Somme théologique, Paris : Editions du Cerf, 1984, BX 1749 T445 1984 [SH]
- [3] ARISTOTE, Histoire des animaux, Paris : Belles Lettres, 1964., PA 3892 A4 1964 [SH]
- [4] ARISTOTE, Physique, Paris : Belles Lettres, 1926., Q 151 A75 1926 [SH]
- [5] Bernadette BENSAUDE-VINCENT, La genèse du tableau de Mendeleïev, La Recherche, **159** (1984) 1206.
- [6] J. D. BERNAL, Science in History, Cambridge : MIT Press, 1971., CB 151 B4S 1 [SH]
- [7] Claude BERNARD, Introduction à l'étude de la médecine expérimentale, Paris : Librairie Delagrave, 1946., R 850 B47 1946 [SH]
- [8] Brian BOWERS, A history of electric light and power, London : Peregrinus, 1982, TK 57 B6 1982 [SCI]
- [9] D.S.L. Cardwell, Les débuts de la thermodynamique, La Recherche, **48** (1974) 726.
- [10] Sadi CARNOT, Réflexions sur la puissance motrice du feu, Paris : J. Vrin, 1978, QC 311 C28 1978 [SH]
- [11] Pierre CARTIER, Kepler et la musique du monde, La Recherche, **278** (7/95) 751.
- [12] Bernard COHEN, Newton et la découverte de la gravitation universelle, Pour La Science, **43** (1981) 100.
- [13] Bernard COHEN, Les origines de la physique moderne, Paris : Seuil, 1993, QC 122 C6314 1993 [SCI]
- [14] John CHRISTIANSEN, The Celestial Palace of Tycho Brahe, Scientific American, 204 (2/61) 118.
- [15] John D. COOPER, Richard H. MILLER, Jacqueline PATTERSON, A trip through time : principles of historical geology, Columbus, Ohio : Merrill Pub. Co, 1990, QE 28.3 C66 1990 [SH]
- [16] Nicolas COPERNIC, Des révolutions des orbes célestes, Paris : Alcan, 1934., QB 41 C66D 1934 [SH]
- [17] Alistair Cameron CROMBIE, Histoire des sciences de saint Augustin à Galilée (400-1650), Paris : Presses Universitaires de France, 1959, Q 125 C76H 1959 [SCI, SH]
- [18] Amy DAHAN-DALMEDICO et Jeanne PEIFFER, Une histoire des mathématiques, Paris : Seuil, 1986, QA 21 D33 1986 [SCI]
- [19] Charles DARWIN, L'origine des espèces au moyen de la sélection naturelle : ou La lutte pour l'existence dans la nature, Paris : Costes, 1951., QH 375 D37O 1951F [SH]
- [20] Maurice DAUMAS, Histoire générale des techniques, Paris : Presses universitaires de France, 1962-1979., T 15 D35H 1962 [SH]
- [21] René DESCARTES, Discours de la méthode, Paris, Editions Lutecia, 1946., B 1845 1946A [SH]
- [22] René DESCARTES, Les principes de la philosophie, Paris : Vrin, 1967., B 1861 D87 1967 [SH]
- [23] Jared DIAMOND, Guns, Germs, and Steel : The fates of human societies, New York : W.W. Norton and company, 1999.,
- [24] DIOGÈNE LAËRCE, Vie, doctrines et sentences des philosophes illustres, Paris : Garnier-Flammarion, 1965., B 168 D55V 1965 [SH]
- [25] Stillman DRAKE, La pomme de Newton et le dialogue de Galilée, Pour La Science, **36** (1980) 93.

- [26] Michael ECKERT et Helmut SCHUBERT, Crystals, electrons, transistors, New York : AIP, 1990., Q 125 E3513 19 [SCI]
- [27] Albert EINSTEIN, La relativité, Paris : Payot, 1956., QC 6 E55RE 1956 [SH]
- [28] Albert EINSTEIN et Léopold INFELD, L'évolution des idées en physique, Paris : Payot, 1968., QC 7 E55E 1968 [SH]
- [29] EUCLIDE, Éléments, Paris : Éditions du CNRS, 1978., QA 31 E82 1978 [SH]
- [30] GALILÉE, Siderus nuncius, Le message céleste, Paris : Gauthier-Villars, 1964., QB 41 G34G 1964 [SH]
- [31] GALILÉE, Dialogues, Paris : Hermann, 1966., QB 41 G34D 1966 [SH]
- [32] GALILÉE, Discours et démonstrations mathématiques concernant deux sciences nouvelles, Paris : Colin, 1970., QB 41 G34I 1970 [SH]
- [33] Edward GIBBON, Histoire du déclin et de la chute de l'empire romain, Londres : Dent, 1962 (anglais). Paris : Flammarion (Bouquins) (français), DG 311 G52D 196 [SH] (anglais)
- [34] Owen GINGERICH, Copernicus and Tycho, Scientific American, **229** (12/73) 86.
- [35] Owen GINGERICH, L'affaire Galilée, Pour La Science, **60** (1982) 68.
- [36] Christian HUYGENS, Traité de la lumière, Paris : Gauthier-Villars, 1920., QC 425 H89T 1920 [SCI]
- [37] Georges IFRAH, Histoire universelle des chiffres, Paris : Robert-Laffont, 1994, QA 141.2 I36 1981 [SH]
- [38] Zbigniew JAWOROWSKI, Radiation Risk and Ethics, Physics Today, Septembre 1999, p. 24.
- [39] Morris KLINE, Mathematical thought from ancient to modern times (3 volumes), New York : Oxford University Press, 1990, QA 21 K54 1972 V.1,2,3 [SCI]
- [40] Arthur KOESTLER, Les somnambules : essai sur l'histoire des conceptions de l'univers, Paris : Calmann-Lévy, 1961, BL 245 K63S 1961F [SH]
- [41] Arthur KOESTLER, Le cri d'Archimède : l'art de la découverte et la découverte de l'art, Paris : Calmann-Lévy, 1965, BF 408 K63A 1965F [SH]
- [42] Thomas S. KUHN, La structure des révolutions scientifiques, Paris : Flammarion, 1983, Q 175 K9514 1983 [SH]
- [43] André LANGANEY, Ce que l'on ne sait pas de l'évolution, La Recherche, **296** (3/97) 118.
- [44] René LECLERCQ, Histoire et avenir de la méthode expérimentale, Paris : Masson, 1960., Q 125 L42h 1960S [SCI]
- [45] Benoît LELONG, Personne n'a découvert l'électron, La Recherche, **303** (1997) 80.
- [46] Lawrence LERNER et Edward GOSSELIN, Galilée et le fantôme de Giordano Bruno, Pour La Science, **111** (1987) 62.
- [47] Philippe L'HÉRITIER, L'histoire de la génétique, La Recherche, **35** (1973) p. 557.
- [48] Bernard MAITTE, La Lumière, Paris : Seuil, 1981
- [49] Robert MASSAIN, Chimie et chimistes, Paris : Magnard, 1961., QD 11 M38C 1961 [SCI, SH]
- [50] Robert MASSAIN, Physique et physiciens, Paris : Magnard, 1962., QC 7 M38P [SCI, SH]
- [51] Jean-Pierre MAURY, Petite histoire de la physique, Paris : Larousse, 1992, QC 7 M37 19 [SCI]
- [52] Ernst MAYR, Histoire de la biologie : diversité, évolution et hérédité, Paris : Fayard, 1989, QH 305 M3914 1989 [SCI]
- [53] Joseph NEEDHAM, La science chinoise et l'Occident, Paris : Seuil, 1973, CB 253 N4314 1973 [SH]
- [54] Isaac NEWTON, Principes mathématiques de la philosophie naturelle, Paris : Blanchard, 1966., QA 803 C33 1966 [SCI]
- [55] Isaac NEWTON, Traité d'optique, Paris : Gauthier-Villars, 1955., QC 353 N49O 1955F [SCI]
- [56] H. T. PLEDGE, Science since 1500, New York : Harper, 1959., Q 125 .P6S 1959 [SCI]
- [57] Claude PTOLÉMÉE, Composition mathématique (Almageste), Paris : Grand, 1813., QB 41 P76C 1813 [SH]

- [58] Claude PTOLÉMÉE, Ptolemy's Almagest (traduction anglaise de G.J. Toomer), Princeton : Princeton University Press, 1998., QB 41 P95714 1998 [SCI]
- [59] Dennis RAWLINS, Ancient heliocentrists, Ptolemy, and the equant, American Journal of Physics, **55**, mars 1987, p. 235.
- [60] P. RICHET, La radioactivité, Le Soleil, La Terre et la mort de Kelvin, La Recherche, **291** (10/96) p. 78.
- [61] Arnold REYMOND, Histoire des sciences exactes et naturelles dans l'antiquité gréco-romaine, Paris : Presses Universitaires de France, 1955., Q 125 R49H 1955 [SCI]
- [62] Colin RONAN, Histoire mondiale des sciences, Paris : Seuil, 1988, Q 125 R6514 1988 [SH]
- [63] Jean ROSMORDUC, Une histoire de la physique et de la chimie, Paris : Seuil, 1985, QC 7 R67 1985 [SH]
- [64] Jean ROSTAND, Esquisse d'une histoire de la biologie, Paris : Gallimard, 1945, QH 305 R68E 1945 [SH]
- [65] Jean-René ROY, L'astronomie et son histoire, Québec : PUQ et Paris : Masson, 1982, QB 43.2 .R69 1982 S [SCI]
- [66] Lucio RUSSO, The forgotten revolution, Berlin : Springer-Verlag, 2004.
- [67] Lucio RUSSO, The astronomy of Hipparchus and his time : A study based on pre-ptolemaic sources., Vistas in Astronomy, **38**, 207 (1994).
- [68] George SARTON, Hellenistic Science and Culture in the Last Three Centuries B.C., Harvard University Press, 1959. Dover, 1993
- [69] Marc SÉGUIN et Benoît VILLENEUVE, Astronomie et astrophysique, Éditions du Renouveau Pédagogique, 1995, QB43.2 S43 1995 S [SCI]
- [70] Emilio SEGRÈ, From falling bodies to radio waves : classical physicists and their discoveries, New York, W.H. Freeman, 1984, QC 7 S435 1984 [SCI]
- [71] Emilio SEGRÈ, Les physiciens modernes et leurs découvertes : des rayons x aux quarks, Paris : Fayard, 1984, QC 7 S4414 1984 [SH]
- [72] Michel SERRES, Éléments d'histoire des sciences, Paris : Bordas, 1989, Q 125 E54 1989 [SH]
- [73] Harold I. SHARLIN, From Faraday to the Dynamo, Scientific American, **204** (1961) 107.
- [74] David Eugene SMITH, History of Mathematics, New York : Dover, 1958, QA 21 S55H 195 [SH]
- [75] Alan D. SOKAL et Jean BRICMONT, Impostures intellectuelles, Paris : Odile Jacob, 1997, CB 428 S64 1997 [SH]
- [76] René TATON, La science antique et médiévale, Paris : Presses Universitaires de France, 1957, Q 125 T23 1957 [SH]
- [77] René TATON, La science moderne, Paris : Presses Universitaires de France, 1958, Q 125 T23 1957 [SH]
- [78] René TATON, La science contemporaine I : le XIXe siècle., Paris : Presses Universitaires de France, 1961, Q 125 T23 1957 [SH]
- [79] René TATON, La science contemporaine II : le XXe siècle, 1900-1960, Paris : Presses Universitaires de France, 1964, Q 125 T23 1957 [SH]
- [80] Lynn THORNDYKE, History of Magic and Experimental Science, New York : Columbia University Press, 1923, Q 125 .T36h 1923 [SCI]
- [81] Pierre THUILLIER, Comment est née la biologie moléculaire, La Recherche, **23** (5/72) 439.
- [82] Pierre THUILLIER, Une énigme : Archimède et les miroirs ardents, La Recherche, **100** (5/79) 444.
- [83] Pierre THUILLIER, Bible et science : Darwin en procès, La Recherche, **123** (1981) 710.
- [84] Pierre THUILLIER, Isaac Newton, un alchimiste pas comme les autres, La Recherche, **212** (7/89) 876.
- [85] Jean-Pierre VERDET, Une histoire de l'astronomie, Paris : Seuil, 1990, QB 15 V44 1990 [SCI]
- [86] Christiane VILAIN, Genèse d'une idée : l'expansion de l'univers, La Recherche, **284** (1996) 104.
- [87] Steven WEINBERG, Une vision corrosive du progrès scientifique, La Recherche, **318** (1999) 72.
- [88] Richard S. WESTFALL, Never at Rest : A biography of Isaac Newton, Cambridge : Cambridge University Press, 1980, QC 16 N7W35 198 [SH]

- [89] Pearce WILLIAMS, André-Marie Ampère, *Pour la Science*, **137** (1989) 76.
- [90] Curtis WILSON, How did Kepler Discover his First Two Laws ?, *Scientific American*, **226** (3/72) 92.
- [91] Hendrik C.D. de WIT, *Histoire du développement de la biologie*, Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes, 1992–94, QH 305 W57 1992–1994 [SCI]

Index

- abaque, 52
- Abélard, Pierre, 63
- Abu al-Husayn al-Sufi, 56
- Abu Kamil, 56
- Académie
 - des sciences, 100, 191
 - platonicienne, 29, 48
- Achille et la tortue, 28
- activité optique, 143
- Adams, John Couch, 164
- Adélarde de Bath, 59
- ADN, 196
- Agricola, 133
- Airy, George, 164
- Al-Battani, 56
- Al-Biruni, 56
- Al-Karagi, 56
- Al-Kashi, 56, 58
- Al-Khayyam, 56
- Al-Khwarizmi, 56, 57
- Al-Ma'mun, 57
- Al-Razi, 56
- Al-Samaw'al, 56
- Albert le Grand, 62
- alchimie, 131
- Alcméon de Crotone, 34
- Alexandre le Grand, 21, 35
- Alexandrie, 35, 48
- algèbre, 56
 - chaldéenne, 18
 - chinoise, 53
 - notation, 69
- algorithme, 56
- Alhazen, 56, 94
- Almageste, 42, 59
- Alphonse X de Castille, 44
- ambre, 101
- American Physical Society, 7
- American Telephone and Telegraph, 205
- Amici, Giovanni Battista, 187
- Ampère, André-Marie, 100, 103, 141
- anaérobie (processus), 190
- Anaximandre, 26
- Anaximène, 26
- Andronicos de Rhodes, 31
- antimoine, 132
- apex, 163
- Appolonius, 39
- arabe (science), 55
- Arago, François, 100
- arc-en-ciel, 95
- Archimède, 24, 37
 - principe hydrostatique, 38
- Archytas de Tarente, 27
- Aristarque, 39
- Aristote, 31–33, 94, 188, 189
- ARN, 199
- artères, 45
- Asclépios, 34
- astronomie
 - égyptienne, 15
 - chinoise, 53
 - Copernic, 74
 - Galilée, 80
 - indienne, 54
 - Kepler, 79
 - Tycho Brahé, 77
- atomique
 - théorie, 28
- atomistes, 93
- atrabile, 35
- Averroès, 56
- Avery, Oswald T., 196
- Avicenne, 56
- Avogadro, Amedeo, 141
- Azophi, 56
- Babbage, Charles, 201
- Bacon, Francis, 90, 205
- Bacon, Roger, 63, 101
- Balmer, Johann Jacob, 149
- Bardeen, John, 205
- Becker, Johann, 134
- Beeckman, Isaac, 85
- Bell Labs, 205
- Bell, Alexandre Graham, 205
- benzène, 103, 145
- Bernoulli, Daniel, 127, 140
- Berthollet, Claude, 138
- Berzélius, Jöns Jakob, 142

- Bessel, Friedrich Wilhelm, 165
 Bethe, Hans, 158
 Bhaskara, 68
 big bang, 170
 bile, 35
 bile noire, 35
 Biot, Jean-Baptiste, 122, 144
 biréfringence, 98
 Biringuccio, Vannoccio, 133
 Black, Joseph, 114, 121, 135
 Boerhaave, Hermann, 114
 Bohr, Niels, 151
 Boltzmann, Ludwig, 127
 Bombelli, Rafaël, 71
 Born, Max, 152
 bosons, 158
 boulier, 201
 boussole, 51, 101
 Boyle, Robert, 114, 134
 Bragg, W.H. et W.L., 155, 197
 Brattain, W.H., 205
 Briggs, Henry, 69
 Bruno, Giordano, 77
 Buckland, William E., 174
 Buffon, George Louis Leclerc, comte de, 174
 Bunsen, Wilhelm, 148
 Buridan, Jean, 65
 Bush, Vannevar, 202
 byzantin (empire), 48

 Cagniard de Latour, Charles, 190
 calcul infinitésimal, 72
 calendrier, 87
 égyptien, 15
 chinois, 53
 grégorien, 87
 indien, 54
 julien, 15
 lunaire, 19
 calorique, 114, 122
 Camerarius, Rudolf Jakob, 189
 Cannizzaro, Stanislao, 141
 capacité calorifique, 114
 Cardan, Jérôme, 70
 Carnot, Sadi, 122
 cartes géographiques, 22, 66
 Casaubon, Isaac, 132
 Cassini, Jean-Dominique, 165
 Cauchy, Augustin, 74
 Cavalieri, Bonaventura, 73
 Cavendish, Henry, 135
 Celsius, Anders, 114
 céphéïdes, 166
 Cesalpino, 187

 chaleur latente, 113, 120
 Chappe, Claude, 205
 Chargaff, Erwin, 197
 Charles, Jacques, 117, 137
 Chase, Martha, 196
 Chevreul, Eugène, 143
 chiffres indiens, 55
 Chine, 51
 christianisme, 47, 81
 Christin, J.-P., 114
 chromosomes, 194
 chronologie, 20, 50
 chute des corps, 65, 83
 cinétique (théorie), 127
 Clapeyron, Émile, 123
 Clausius, Rudolf, 124
 clepsydres, 15
 Cnide, école de, 34
 codon, 199
 Cohn, Ferdinand, 191
 Coiter, Volcher, 186
 comètes, 78
 compressibilité, 118
 Comte, Auguste, 142
 condenseur de Watt, 120
 coniques, 39, 56
 Constantin, 48
 Copernic, Nicolas, 74
 corde (d'un angle), 41
 Cos, école de, 34
 cosmologie, 168
 Aristarque, 39
 chinoise, 53
 Copernic, 74
 Kepler, 79
 Platon, 29
 Tycho Brahé, 78
 couches sédimentaires, 173
 Coulomb, Charles-Augustin, 103
 loi de, 103
 Crick, Francis, 197
 croisements génétiques, 192
 Crookes, William, 150
 Cugnot, Joseph, 121
 cunéiforme (écriture), 18
 Curie, Pierre et Marie, 155
 Cuvier, George, 174, 180
 cyclisme (astronomie), 54
 Cyrille d'Alexandrie, 48

 Dalton, John, 140
 Darwin, Charles, 180
 Davisson, C.J., 152
 Davy, Humphry, 103, 141

- de Broglie, Louis, 152
- DeForest, Lee, 205
- Deluc, J.-A., 114
- Démétrius de Phalère, 36
- Démocrite, 138
- Démocrite d'Abdère, 28
- Descartes, René, 85
 - géométrie, 71
 - loi de la réfraction, 95
 - notation algébrique, 70
 - physique de, 86
- Dietrich de Freiberg, 94
- diffraction, 96
- Diophante, 47
- Dirac, Paul, 152
- dispersion, 96
- drosophile (mouche), 195
- Du Fay, Charles, 102
- Dumas, Jean-Baptiste, 143
- duplication du cube, 29

- écluses, 51
- écorces, 93
- Eddington, Arthur, 170
- Égypte, 14
 - chronologie, 14, 18
 - médecine, 16
 - mathématiques, 15
- Einstein, Albert, 110, 168
- électricité, 101
 - positive et négative, 102
 - vitrée et résineuse, 102
- électroaimant, 103
- électrolyse, 103, 141
- électron, 150
 - facteur gyromagnétique, 154
- Éléments d'Euclide, 36
- éléments
 - air, eau, feu, terre, 29, 32, 132
 - classification périodique, 147
 - selon Boyle, 134
 - selon Dalton, 140
 - selon Lavoisier, 139
 - selon les Chinois, 53
- ellipse, 72, 80, 89
- Empédocle d'Agrigente, 28, 34
- énantiomères, 143, 145
- énergie, 87
- ENIAC, 202
- enjambement (génétique), 195
- entropie, 125, 126, 153
- enzyme, 196
- épicycle, 42, 75
- épigénèse, 189
- épissage, 199
- équant, 43
- équations
 - cubiques, 70
 - linéaires, 15, 53
 - quadratiques, 18, 53, 56
- équinoxes, précession des, 41, 89
- équivalent (atomique), 143
- Érasistrate, 46
- Ératosthène, 40
- Esculape, 34
- espèces
 - évolution, 177
 - classification, 33, 177
- étriers, 51
- Euclide, 23, 36, 93, 94
- Eudoxe de Cnide, 29
- Euler, Leonhard, 74
- exons, 199
- expérimentale, méthode, 64, 90

- Fahrenheit, Daniel Gabriel, 113
- Fallope, Gabriel, 186
- Faraday, Michael, 103, 142
- fécondation, 194
- fer, âge du, 13
- Fermat, Pierre de, 71
- Ferme générale, 138
- fermentation, 190
- Fermi, Enrico, 158
- fermions, 158
- Fibonacci, 67
- Fitzgerald, George Francis, 108
- Fizeau, Hippolyte, 100
- flegme, 35
- Flemming, Walter, 194
- fonte, 51
- force centrifuge, 87
- fossiles, 53, 133, 174
- Foucault, Léon, 100
- Fourcroy, Antoine de, 138
- Frankland, Edward, 145
- Franklin, Benjamin, 102
- Franklin, Rosalind, 197
- Fraunhofer, Joseph, 147
- Fresnel, Augustin, 99
- Freundlich, Erwin, 170
- Frisch, Otto, 157
- Fulton, Robert, 121

- galaxies, 167
 - récession des, 168
- Galien, 46, 133
- Galilée, 80

- mécanique, 83
- Galle, Johann, 164
- Galvani, Luigi, 102
- Gay-Lussac, Louis-Joseph, 117
- gaz
 - carbonique, 135
 - hilarant, 141
 - lois des, 140
 - rares, 148
 - sylvestre, 133
- Geber, 56, 132
- Geiger, Hans, 150
- Gell-Mann, Murray, 158
- Geminos, 39
- génération spontanée, 188, 189
- Geoffroy Saint-Hilaire, Étienne, 180
- géométrie
 - égyptienne, 15
 - analytique, 71
 - chaldéenne, 19
 - chinoise, 52
 - grecque, 29, 36, 39
 - non euclidienne, 169
- Gerbert d'Aurillac, 59
- Gerhardt, Charles, 143
- Germer, L.H., 152
- Gibbs, Josiah Willard, 127
- Gilbert, William, 101
- Goethe, Johann Wolfgang von, 180
- Gramme, Zénobe, 106
- Grande Grèce, 21
- gravitation universelle, 89, 163, 169
- Gray, Stephen, 102
- Gregory, James, 73
- Grimaldi, Francesco Maria, 96
- Grosseteste, Robert, 63
- Grossmann, Marcel, 169
- Guericke, Otto von, 116
- Guyton de Morveau, Louis Bernard, 138

- Haeckel, Ernst H., 180
- Harvey, William, 186
- Haüy, René-Just, 144
- Heisenberg, Werner, 152
- hélium, 162
- hélium
 - abondance cosmique, 171
- hellénistique (période), 35
- Helmholtz, Hermann, 124
- Héraclide du Pont, 39
- Hermès Trismégiste, 132
- Hérodote, 15
- Héron d'Alexandrie, 39
- Hérophile, 45

- Herschel, William, 162
- Hershey, Alfred, 196
- Hertwig, Oscar, 194
- Hertz, Heinrich, 106
- Hertzprung, Ejnar, 166
- Hilbert, David, 169
- Hipparque, 41
- Hippocrate, 34, 189
- Hollerith, Herman, 202
- Hooke, Robert, 89, 134, 187
- horloges, 51
 - à eau, 15
 - pendule, 87
- Hubble, Edwin, 167
- humeurs, théorie des, 35
- Hutton, James, 175
- Huygens, Christian, 73, 86, 187
 - théorie ondulatoire, 97
- hydrogène, 135
- Hypatie d'Alexandrie, 48
- hypothético-déductive, méthode, 90

- IBM, 202
- Imhotep, 16
- impetus, 48, 65
- imprimerie, 51
- Inde, 53
- induction électromagnétique, 103
- inertie, 83, 88, 97
- Inquisition, 77, 81
- Intel, 206
- interférences, 99
- introns, 199
- Islam, 55

- Jabir Ibn-Hayyan, 56
- Jacob, François, 199
- Jacquard, Joseph-Marie, 202
- Janssen, Jules, 162
- Jouffroy d'Abbans, 121
- Joule, James Prescott, 115, 124
- Jundishapur, 48
- Jupiter, satellites de, 81
- Justinien, 48

- Kant, Emmanuel, 167
- Kéculé von Stradonitz, August, 145
- Kelvin, Lord, 124
- Kepler, Johannes, 72, 79, 94
 - lois de, 80, 89
- Kilby, Jack, 206
- Kirchhoff, Gustav Robert, 98, 147
- Kuhn, Thomas, 210

- Lamarck, Jean-Baptiste de Monet de, 179

- Laplace, Pierre Simon, marquis de, 164, 167
 Laue, Max von, 155
 Lavoisier, Antoine-Laurent, 136
 Le Bel, Achille, 145
 Le Gentil, Guillaume, 165
 Le Verrier, Urbain, 164
 Leavitt, Henrietta, 166
 Leeuwenhoek, Antony van, 187
 Leibniz, Gottfried von, 73, 201
 Lemaître, Georges, 171
 Leucippe, 28, 138
 liaison génétique, 195
 libre parcours moyen, 127
 Linné, Carl von, 177
 Lockyer, Joseph Norman, 162
 logarithmes, 68
 Lomonossov, Mikhail V., 134
 Lorentz, Hendrik Anton, 109
 Lucrèce, 47
 lunette astronomique, 80, 161
 Luther, Martin, 77
 Lwoff, André, 199
 Lycon, 31
 Lyell, Charles, 175
 lymphe, 35
 Lyssenko, Trofim Denisovitch, 182

 Ménechme, 39
 Mach, Ernst, 130
 machine
 électrostatique, 101
 à vapeur, 118
 Macloed, C., 196
 magie, 11
 Magnésie, 101
 magnétisme, 101
 magnitude (étoile), 166
 Malthus, Thomas R., 181
 Marconi, Guglielmo, 108
 Maricourt, Pierre de, 101
 Mariotte, Edme, 91, 117
 MARK 1, 204
 Maupertuis, Pierre-Louis Moreau de, 90, 179
 Maxwell
 équations de, 104, 105
 démon de, 129
 Maxwell, James Clerk, 105, 127
 Mayer, Julius Robert von, 124
 McCarty, M., 196
 mécanique
 céleste, 164
 de Galilée, 83
 de Newton, 88
 ondulatoire, 152
 quantique, 151
 Meitner, Lise, 157
 Mendel, Gregor, 192
 Mendéleïev, Dimitri, 147
 Mercure
 périhélie de, 170
 Mesmer, Franz Anton, 102
 méson, 158
 Mésopotamie, 16
 métaux, âge des, 12
 métempsychose, 27
 Michelson, A.A., 108
 Micrographia, 187
 microprocesseur, 206
 microscope, 187
 électronique, 188
 Miescher, Friedrich, 196
 Milet, 21
 Minkowski, Hermann, 110
 miroirs ardents, 38
 Mitscherlich, Eilhard, 144
 molécules, 141
 structure, 144
 Mongols, 57
 Monod, Jacques, 199
 Morgan, Thomas Hunt, 195
 Morley, E.W., 108
 Morse, Samuel, 205
 mouffle, 38
 moyen-âge, 58
 Müller, Fritz, 180
 Muller, H.J., 195
 musique, 27
 Musschenbroek, Petrus van, 101
 mutations, 195

 Nagaoka, 150
 Napier, John, 68
 nébuleuses, 163
 néolithique, 12
 Neptune, 163
 nerfs, 46
 neutrinos, 159
 neutron, 157
 Newcomen, Thomas, 120
 Newton, Isaac, 42, 87, 140
 fluxions, 73
 lois de, 88
 optique, 97
 personnalité, 97
 nombres
 complexes, 71
 irrationnels, 27
 triangulaires, 27

- novas, 78, 80
- noyau atomique, 156
- nucléaire (énergie), 157
- nucléine, 196
- numération
 - égyptienne, 15
 - chaldéenne, 18
 - chinoise, 52
 - indienne, 54
- Occam, Guillaume d', 63
- Oersted, Christian, 103
- Oken, Lorenz, 180
- ondes, 87, 97, 152
 - électromagnétiques, 106, 107, 109
- orbitales, 154
- orbite rétrograde, 43
- Oresme, Nicole, 65
- Organon, 31, 90
- Osiander, Andreas, 77
- Ostwald, Wilhelm, 130
- Owen, Richard, 180
- oxygène, 135
- Pacioli, Luca, 68
- paléolithique, 12
- palimpeste, 24
- Palissy, Bernard, 133
- Papin, Denis, 118
- Paracelse, 133
- paradigme (selon Kuhn), 210
- parallaxe, 75, 165
- Parménide, 27
- particules élémentaires, 158
- Pascal, Blaise, 115, 201
- pascaline, 201
- Pasteur, Louis, 144, 190
- pasteurisation, 191
- Pauli, Wolfgang, 152
- pendule, 73, 87
- Penzias, Arno, 171
- Perrin, Jean, 150
- Perse, 48
- peste noire, 59
- Philolaos, 27
- Philopon, Jean, 48
- philosophie hermétique, 132
- phlogistique, 134
- photographie, 162
- photon, 111
- pi (π), 15, 19, 37, 53
- Picard, Jean, 89
- pierre philosophale, 131
- pituite, 35
- Planck, Max, 111
- Platon, 28
 - vues sur les égyptiens, 15
- Platon de Tivoli, 59
- Pline l'Ancien, 47
- plum pudding (modèle du), 150
- pneuma, 34, 46
- Poincaré, Henri, 108
- Poisson, Denis, 100
- polarisation de la lumière, 99
- polyèdres, 29
- Popper, Karl, 209
- positivisme, 77, 142
- Pouchet, F.A., 191
- poudre à canon, 51, 138
- poudre de projection, 131
- préformation, 189
- présocratiques, 25
- pressions partielles (loi des), 140
- Prévost, Constant, 175
- Priestley, Joseph, 103, 135
- principe
 - d'équivalence, 168
 - d'inertie, 42, 65, 83, 109
 - de Fermat, 95
- Principia de Newton, 88
- probabilité
 - nuage de, 154
- probabilités
 - théorie des, 72
- proportions définies (loi des), 140
- Proust, Joseph Louis, 140
- Ptolémée, Claude, 42
- Ptolémées (rois), 36
- pyramides, 14
- Pythagore, 27
 - théorème de, 19, 52
- quadrature du cercle, 29
- quantité de mouvement, 86, 89
- quarks, 158
- quid, 93
- révolutions scientifiques (selon Kuhn), 210
- radioactivité, 154
- Ramsay, William, 147
- rasoir d'Occam, 63, 143
- rayonnement de fond cosmique, 171
- rayons
 - alpha, beta, gamma, 155
 - cathodiques, 150, 155
 - X, 154
- Réaumur, R.A. Ferchault de, 114
- Redi, Francesco, 188

- réfraction, 95
- Regnault, Henri Victor, 118
- relativité, 108
 - générale, 168
- rétrograde (orbite), 75
- Rey, Jean, 136
- Rhazès, 56
- Richter, Jeremias Benjamin, 143
- Roberval, Gilles Personne de, 73, 116
- Röntgen, Wilhelm Konrad, 154
- Roscellin, 63
- Rumford, 115
- Russell, Henry Norris, 166
- Rutherford, Ernest, 150, 155
- Rydberg, Johannes Robert, 149

- Saint-Augustin, 132
- sanskrit, 53
- saros (éclipses), 26
- Saturne, 81
 - anneaux de, 87
- Savasorda, 59
- Savery, Thomas, 119
- Scheele, Carl Wilhelm, 135
- Schleiden, Mathias, 187
- Schrödinger, Erwin, 152
- Schwann, Theodor, 187
- Schwarzschild, Karl, 170
- science
 - égyptienne, 14
 - étymologie, 7
 - arabe, 55
 - chinoise, 51
 - définition (selon l'APS), 7
 - grecque, 21
 - indienne, 53
 - médiévale, 58
 - mésopotamienne, 16
 - normale, 210
 - vs techniques, 8
- scolastique, 60
- Scot, Duns, 63
- Séleucos de Babylonie, 42
- semiconducteurs, 205
- Shapley, Harlow, 167
- Shockley, William, 205
- Silicon Valley, 206
- simulacres, 93
- sinus, 54
- Snell, Willebrord, 95
- Socrate, 28
- Somme Théologique, 62
- Sommerfeld, Arnold, 152
- spectroscopie, 147, 162
- sphère des étoiles fixes, 26, 27, 30, 33, 39
- sphères homocentriques (Eudoxe), 29, 56, 78
- Stahl, Georg, 134
- Sténon, 174
- stéréochimie, 143
- Stevin, Simon, 68
- Strasburger, Eduard, 194
- Straton de Lampsaque, 31, 36
- Struve, Friedrich Wilhelm Georg, 165
- sublunaire (monde), 33
- Sutton, Walter, 195
- Swammerdam, Jan, 189
- Syène (Égypte), 40
- synthèse asymétrique, 143
- syriaque (langue), 48
- système solaire, 75
- Szilar, Leo, 158

- taches solaires, 81
- Tartaglia, 70
- technologie
 - électrique, 106
 - de la vapeur, 118
- télégraphe électrique, 205
- téléphone, 205
- télescope, 80, 161
- température
 - absolue, 124
- tempéraments, théorie des, 35
- Terre
 - évolution, 173
 - forme, 89
 - rayon de la, 40, 89
- Tesla, Nicolas, 106
- Thalès de Milet, 26, 101
- théologie, 63
- théologie naturelle, 174
- Théon d'Alexandrie, 48
- Théophraste, 31
- Thomas d'Aquin, 62
- Thomas de Colmar, 201
- Thomson, Joseph John, 150
- Timocharis d'Alexandrie, 41
- Torricelli, Evangelista, 115
- tourbillons (Descartes), 86
- Tournesol, Hyppolite, 156
- transistor, 205
- Trevithick, 121
- trigonométrie, 41
- trisection de l'angle, 29
- Triton, 164
- Tycho Brahé, 77

- unité astronomique, 165

- universités, 60
- Uraniborg, 77
- Uranus, 162

- valence, 145
- Valentin, Basile, 132
- Van Helmont, Jan Baptist, 133
- Van't Hoff, Jacobus Henricus, 145
- vedas, 53
- veines, 45
- Vénus, 81
 - passage de, 165
- Vésale, André, 185
- Viète, François, 70
- Virchow, Rudolf, 187
- vision (oeil), 93, 94
- Vitruve, 47
- Volta, Alessandro, 102
- Voltaire, 90
- von Neumann, John, 202
- Vries, Hugo de, 195
- Vulcain, 170

- Wallace, Alfred Russell, 181
- Wallis, John, 73
- Watson, James, 197
- Watt, James, 120
 - indicateur de, 120
- Wegener, Alfred, 176
- Wells, H.G., 157
- Werner, Abraham Gottlob, 175
- Wilkins, Maurice, 197
- Wilson, Robert, 171
- Witelo, 94
- Wöhler, Friedrich, 143
- Wollatson, William, 147

- yin et yang, 53
- Young, Thomas, 99

- Zénon d'Élée, 28
- zéro, 55